ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ

СПРАВОЧНОЕ ПОСОБИЕ

Под редакцией В. В. Смирнова

Ленинград
ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ
Ленинградское отделение
1986

ББК 31.26
О 45
УДК 621.791.65.03 (035.5)

С. М. Белинский, А. Ф. Гарбуль, В. Г. Гусаковский,
С.-А. А. Диржис, М. И. Закс, А. В. Иванников,
Б. А. Каганский, Ю. И. Каросас, Е. В. Коллегов,
О. М. Кулешов, Л. Н. Кушнарев, М. С. Неймарк,
А. А. Печенин, А. Л. Рывкин, В. Г. Рывкина,
В. В. Смирнов, Б. Я. Темкин, М. П. Соколов (составитель),
Ю. В. Цыганков

Рецензент *А. А. Самодуров*

Оборудование для дуговой сварки: Справочное
О45 пособие /Под ред. В. В. Смирнова. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. — 656 с.: ил.

Рассмотрены современное оборудование для дуговой сварки и его технологические возможности. Приведены сведения о технических параметрах оборудования, особенностях его конструкций и электрических схем. Даны рекомендации по выбору типа оборудования, его монтажу, эксплуатации и ремонту.

Для инженерно-технических работников, мастеров сварочных участков и студентов.

О $\frac{2302050000-113}{051\ (01)-86}$ 132—85

ББК 31.26

© Энергоатомиздат, 1986

ПРЕДИСЛОВИЕ

Дуговая сварка занимает ведущее место в сварочном производстве. Повышения качества и производительности при изготовлении сварных конструкций можно достичь как путем совершенствования и разработки новых технологических процессов дуговой сварки, так и в результате роста уровня механизации и автоматизации сварочных работ. Важнейшая роль в этом принадлежит разработке и освоению в производстве оборудования, отвечающего современным требованиям.

В нашей стране разработано и выпускается электросварочное оборудование для всех основных способов дуговой сварки: покрытыми электродами, под флюсом, плавящимся электродом в защитных и инертных газах, неплавящимся электродом.

Прогресс, достигнутый в области производства силовой полупроводниковой техники, микроэлектроники, новых электротехнических материалов, позволил разработать широкую номенклатуру современного электросварочного оборудования, отличающегося расширенными технологическими возможностями, повышенной надежностью и меньшими массой и габаритами. Освоено серийное производство более 80 типов новых полуавтоматов, автоматов, трансформаторов, выпрямителей, агрегатов, специального оборудования для дуговой сварки. Это оборудование успешно эксплуатируется в различных отраслях промышленности.

Имеющиеся данные по различным видам оборудования для дуговой сварки разбросаны в различных литературных источниках, что затрудняет пользование ими при изучении и выборе оборудования.

Авторы настоящего справочного пособия считали своей основной задачей отбор и систематизацию наиболее важ-

ных сведений об оборудовании и технологии основных способов дуговой сварки и достаточно популярное их изложение, рассчитанное на широкий круг читателей — инженеров-технологов, проектировщиков, конструкторов и других специалистов электросварочного производства.

В предлагаемой книге рассматриваются принципы разработки оборудования, его эксплуатация и даны рекомендации по его использованию. Приведены сведения об электрических и кинематических схемах, конструктивных и технологических особенностях, которые позволят правильно выбрать тип оборудования и грамотно его эксплуатировать.

Авторы надеются, что материал книги будет способствовать внедрению нового, эффективного электросварочного оборудования, улучшению качества сварных конструкций, повышению производительности труда в сварочном производстве и тем самым скорейшему достижению рубежей, намеченных программой «Интенсификация-90».

Книга написана коллективом специалистов Всесоюзного научно-исследовательского, проектно-конструкторского и технологического института электросварочного оборудования (ВНИИЭСО). В ней использованы также материалы по оборудованию, разработанному в ИЭС имени Е. О. Патона, а также в организациях отраслей промышленности, эксплуатирующих оборудование.

Замечания и пожелания по книге просьба направлять по адресу: 191065, Ленинград, Марсово поле, 1, Ленинградское отделение Энергоатомиздата.

Авторы

ВВЕДЕНИЕ

Первое промышленное производство оборудования для дуговой сварки в СССР было организовано на ленинградском заводе «Электрик» имени Н. А. Шверника. В 1924 г. был изготовлен первый сварочный преобразователь для ручной сварки. В последующие, довоенные годы этим заводом производились наряду с однопостовыми преобразователями многопостовые, трансформаторы для ручной сварки, а с разработкой в 1939 г. Институтом электросварки АН УССР под руководством академика Евгения Оскаровича Патона сварки под флюсом начался выпуск автоматических головок для этого способа. В сороковых годах для сварки под флюсом начался выпуск шланговых полуавтоматов.

Большим шагом вперед явилась разработка в ИЭС имени Е. О. Патона и ЦНИИТМАШе способа дуговой сварки в защитных газах, которая во многих случаях заменила сварку штучными электродами, сварку под флюсом и дала толчок массовому выпуску полуавтоматов, автоматов, различного типа головок и источников сварочного тока для этого способа.

В начале пятидесятых годов были разработаны установки для сварки алюминиевых сплавов неплавящимся (вольфрамовым) электродом в среде аргона с импульсной стабилизацией дуги. Практически одновременно были разработаны полуавтоматы для сварки алюминиевых сплавов плавящимся электродом. Серийный выпуск этого оборудования позволил широко внедрять алюминиевые конструкции в различных отраслях промышленности.

Появление в шестидесятых годах силовых полупроводниковых приборов (тиристоров) и слаботочной полупроводниковой элементной базы позволило заменить вращающиеся преобразователи статическими выпрямителями

и резко повысить качество оборудования для дуговой сварки, уменьшить его массу и габариты, обеспечить постоянные выходные параметры, существенно улучшить стабильность дугового процесса.

Большое значение в обеспечении народного хозяйства оборудованием для дуговой сварки имеет его создание на базе унифицированных узлов и блоков. В восьмидесятые годы этому вопросу уделяется особое внимание.

Дальнейший рост производительности труда при сварочных работах идет за счет автоматизации сварочных процессов, в том числе за счет широкого применения сборочно-сварочных линий, оснащенных автоматическими установками, сварочными роботами и т. п. В этой связи конструкция оборудования будет предусматривать возможность стыковки с компонентами линий, обеспечивать зажигание дуги с первого касания, иметь повышенные показатели надежности и т. д.

В настоящем справочном пособии рассматривается оборудование общего назначения.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ

1.1. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ

Основу оборудования для дуговой сварки составляют источники сварочного тока для ручной сварки штучными электродами, полуавтоматы и автоматы для сварки плавящимся электродом под флюсом и в защитных газах, оборудование для импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом в инертных газах, установки для сварки неплавящимся электродом, специальное оборудование для сварки конкретных изделий.

Структура условных обозначений оборудования приведена в приложении 1.

При выбранном способе дуговой сварки тип оборудования определяют по основному параметру — сварочному току, который рассчитывают в зависимости от заданной производительности сварки или наплавки и площади сечения шва.

Для определения типа оборудования и правильной его эксплуатации, наряду с главными требованиями выбранного способа сварки — производительностью, качеством сварных соединений, металлургическими особенностями, необходимостью термообработки, следует учитывать ряд критериев, связанных с технологическими и эксплуатационными характеристиками оборудования. К ним относятся:

Условия, связанные с конструкцией свариваемого изделия, — протяженность и пространственное расположение швов, удобство подхода к шву и доступность соединения для автомата, число изделий в партии и связанная с этим периодичность переналадки оборудования, точность подготовки соединения под сварку, подача изделия к месту сварки, необходимость отвода оборудования после сварки, связанная с кантовкой или перемещением изделия.

Условия производства — цеховые или монтажные условия, необходимость энергоснабжения, газо- и водоснабжения, возможность отвода аэрозолей от места сварки, требования по очистке от брызг как изделия, так и частей оборудования, уборка флюса, предотвращение ослепления окружающего персонала.

Организационные условия — необходимость обучения сварщиков и наладчиков при переходе на новую технику, создание фонда сменных и запасных частей оборудования, снабжение сварочными материалами и подготовка их для правильной эксплуатации оборудования и т. д.

В индивидуальном и мелкосерийном производстве предпочтение отдают универсальному оборудованию, а также оборудованию, которое построено на модульном принципе и может быть использовано для различных технологических процессов. В крупносерийном и массовом производстве применяют специальное сварочное оборудование, входящее в состав поточно-механизированных линий.

При выборе оборудования ориентируются на традиции, сложившиеся в сварочном производстве по применению основных групп оборудования для дуговой сварки:

Оборудование для сварки штучными электродами остается наиболее распространенной группой оборудования, включающей в себя трансформаторы, преобразователи, агрегаты и выпрямители. Выпускается ряд источников сварочного тока, обеспечивающих сварку всеми типами штучных электродов разнообразных видов соединений сталей на токах до 500 А. Благодаря технологической гибкости ручной сварки штучными электродами, возможности сварки в различных пространственных положениях и простоте организации работ эти источники широко применяются в промышленности, строительстве, в монтажных условиях и эксплуатируются в сложных климатических условиях.

Основной объем работ выполняется электродами диаметром 2—6 мм, лишь в небольшом количестве используются электроды меньшего или большего диаметра.

Недостатками ручной сварки штучными электродами являются весьма низкая производительность и большие потери металла на угар, разбрызгивание и огарки, в сумме составляющие до 30 % массы стержня.

Ручную сварку покрытыми электродами следует применять только в случаях, когда механизированные способы сварки технически или экономически нецелесооб-

разны (например, при ремонте, сварке разнородных материалов, при мелкосерийном производстве изделий, а также в труднодоступных местах).

Выбор источника сварочного тока для ручной дуговой сварки по роду тока. Перед потребителем часто встает вопрос, какой тип оборудования использовать для ручной дуговой сварки — трансформатор или выпрямитель.

Стабильность горения дуги. При использовании трансформатора сварщикам низкой квалификации трудно поддерживать длину дуги постоянной — возникают довольно частые короткие замыкания, в результате чего дуга гаснет и электрод прилипает к изделию. В некоторой степени это явление исключается применением электродов со специальными покрытиями, например рутиловыми, способствующими стабильному поддержанию дуги.

Главной особенностью управляемых полупроводниковых выпрямителей является быстрота реакции на возможные изменения длины дуги вплоть до короткого замыкания, что позволяет резко повысить стабильность горения дуги. Следовательно, с этой точки зрения выбор выпрямителя является предпочтительным.

Магнитное дутье. При ручной сварке дуга может подвергаться воздействию магнитного поля, что вызывает ее отклонение и уменьшает влияние на сварочную ванну. Хотя это явление может наблюдаться при использовании как переменного, так и постоянного тока, дуга постоянного тока подвергается его воздействию чаще. Влияние дутья дуги может быть уменьшено или устранено совсем путем изменения положения зажима обратного провода или положения самого провода относительно изделия.

Качество сварного шва. Известно, что при сварке переменным током значительно чаще получаются непроплавы, неравномерность проплавления, шлаковые включения, некрасивая форма валика и пористость. Эти дефекты являются следствием нарушения покрытия электрода из-за прилипания, непостоянства длины дуги и частого ее гашения. Кроме того, полная зависимость выходного напряжения трансформатора от изменения напряжения питающей сети приводит либо к недостаточному провару, либо к прожогу.

Применение управляемого полупроводникового выпрямителя, имеющего, как правило, устройство стабилизации выходного напряжения, в значительной степени уменьшает эти дефекты.

При сравнении стоимости трансформатора и выпрямителя необходимо учитывать и затраты на ремонтные работы по исправлению дефектов сварного шва, которые зависят от размеров свариваемого изделия и числа дефектных швов.

Надежность и условия эксплуатации. Все трансформаторы для ручной сварки, выпускаемые в стране, отличаются простотой конструкции, отсутствием аппаратуры управления, имеют естественное охлаждение и подключаются к однофазным сетям. Они могут работать на открытом воздухе. Имеют весьма высокие показатели надежности.

Выпрямители, как не имеющие электронного управления, так и с электронным управлением, предназначены для эксплуатации внутри помещений, имеют искусственное воздушное охлаждение и подключаются только к трехфазным сетям.

Если выпрямители без электронного управления по надежности приближаются к трансформаторам, то этого нельзя сказать об управляемых (с электронным управлением) полупроводниковых выпрямителях. Безусловно, что с повышением надежности всей комплектации (транзисторы, тиристоры, микросхемы, печатные платы и т. д.) показатели надежности будут расти. Но в настоящее время по этим показателям предпочтение следует отдать трансформаторам.

Техника безопасности. Известно, что пороговое значение поражающего электрического тока у источников постоянного тока выше, чем у источников переменного тока.

В общем случае выпрямители с напряжением холостого хода до 100 В не требуют ограничителей напряжения, тогда как трансформаторы с напряжением холостого хода до 80 В при эксплуатации в особо опасных условиях должны снабжаться ограничителями. Трансформаторы с напряжением холостого хода свыше 80 В уже независимо от условий эксплуатации должны иметь ограничители.

Ограничитель представляет собой довольно сложное устройство с большим числом электронных элементов. Стоимость трансформатора с ограничителем находится на уровне стоимости выпрямителя (без электронного управления). Кроме того, ограничитель затрудняет зажигание дуги и работа с ним требует большого опыта сварщика.

Оборудование для сварки под флюсом применяется при производстве сварных конструкций, имеющих протяженные швы, например при строительстве мостов, судов, изготовлении вагонов, кранов, резервуаров, цистерн, прямошовных и спиральношовных труб большого диаметра и других изделий. Оборудование общего назначения рассчитано для сварки металлов толщиной 1,5—10 мм, специальные автоматы выполняют сварку металлов толщиной до 400 мм.

Выпускаются автоматы для сварки на постоянном токе до 1250 А и переменном токе до 1000 А. Для обеспечения качества соединений при сварке ответственных конструкций из низко- и высоколегированных сталей различных классов, сплавов на никелевой основе, меди, а также при сварке тонкостенных изделий из малоуглеродистых сталей следует применять автоматы для сварки на постоянном токе.

Специальное оборудование для двух- и трехдуговой сварки комплектуется трансформаторами на токи до 2000 А, в ряде случаев применяют комбинированное питание постоянным и переменным током. Скорость сварки таких автоматов достигает 300 м/ч.

Полуавтоматы для сварки под флюсом используются ограниченно в связи с тем, что они выполняют швы только в нижнем положении, а также из-за невозможности визуального наблюдения за положением электрода по отношению к кромкам стыка.

Ряд предприятий наряду с полуавтоматами для сварки в защитных газах продолжает традиционно применять полуавтоматическую сварку под флюсом, которая характеризуется отсутствием разбрызгивания, возможностью работы сварщика без щитка и маски. Например, этот способ широко применяется при сварке арматуры железобетонных конструкций.

Полуавтоматы для сварки плавящимся электродом в углекислом газе используются в цеховых условиях для сварки соединений, имеющих швы малой протяженности или сложной конфигурации, в различных пространственных положениях. Полуавтоматы применяются также для соединения конструкций, точность сборки которых не отвечает требованиям автоматической сварки. При использовании полуавтоматов взамен ручной сварки штучными электродами производительность повышается в 1,5—3 раза. В сварочных полуавтоматах диапазон малых

токов составляет до 50 А, что обеспечивает возможность сварки изделий из углеродистых сталей толщиной от 0,8 мм, для которых ранее применялась газовая сварка. Полуавтоматы, работающие как в непрерывном, так и в точечном режимах, используются для сварки электрозаклепками при изготовлении конструкций из горячекатаной стали взамен контактной точечной сварки.

Использование порошковой проволоки при сварке и наплавке в углекислом газе позволяет снизить разбрызгивание, применять полуавтоматы и автоматы при изготовлении конструкций из сталей повышенной прочности. Полуавтоматы и автоматы для сварки порошковой проволокой без дополнительной газовой защиты применяются в монтажных условиях при изготовлении стальных и железобетонных конструкций.

Специальные автоматы для сварки порошковой проволокой с принудительным формированием сварочной ванны используются при сварке в различных пространственных положениях, например при сварке неповоротных стыков магистральных трубопроводов (комплекс «Стык»).

Оборудование для сварки плавящимся электродом в инертном газе применяется при изготовлении конструкций из легированных сталей толщиной начиная с 1,5 мм, титана, цветных металлов и сплавов толщиной свыше 2—2,5 мм. В последние годы предпочтение отдается полуавтоматам для импульсно-дуговой сварки, которые позволяют сваривать металл толщиной от 0,8 мм в различных пространственных положениях с применением проволок диаметром 1,2—2,0 мм.

Оборудование для ручной и автоматической сварки неплавящимся электродом в инертных газах применяется при изготовлении разнообразных изделий из конструкционных, легированных сталей, титана, цветных металлов и сплавов толщиной от десятых долей до нескольких десятков миллиметров. Расширяется использование этого оборудования при производстве различных видов оболочек, сосудов, трубопроводов и других изделий, где предъявляются высокие требования к качеству сварных соединений. Хотя производительность установок для сварки неплавящимся электродом меньше по сравнению с оборудованием для сварки плавящимся электродом, их применению отдается предпочтение, когда требуется однородность проплавления в различных пространственных поло-

жениях и недопустимо разбрызгивание электродного металла.

В ряде случаев используются установки для аргонодуговой сварки для выполнения соединений со щелевой разделкой кромок толщиной 20—60 мм взамен сварки плавящимся электродом.

Для некоторых изделий эффективно комбинированное применение установок для аргонодуговой сварки первых проходов с последующим заполнением разделки кромок на оборудовании для сварки плавящимся электродом. При таком сочетании достигается высококачественное полное проплавление корня шва и обеспечивается максимальная производительность.

1.2. РЕЖИМЫ РАБОТЫ

Продолжительный режим — режим работы электротехнического устройства (в том числе сварочного) при неизменной нагрузке, продолжающийся не менее чем это необходимо для достижения устройством установившейся температуры при неизменной температуре охлаждающей среды.

На продолжительный режим работы рассчитано, как правило, сварочное оборудование на токи от 630 А и более для автоматической сварки.

Повторно-кратковременный режим — режим работы электротехнического устройства (в том числе сварочного), при котором работа с неизменной нагрузкой, продолжающаяся менее чем это необходимо для достижения устройством установившейся температуры при неизменной температуре окружающей среды, чередуется с отключениями, во время которых оно не успевает охладиться до температуры охлаждающей среды. Повторно-кратковременный номинальный режим работы характеризуется относительной (в процентах) продолжительностью включения (ПВ), определяемой по формуле

$$\text{ПВ} = \frac{N}{N+P}\,100, \qquad (1.1)$$

где N — время работы; P — пауза.

При повторно-кратковременном режиме работы во время паузы электротехническое устройство отключается от питающей сети.

Повторно-кратковременный режим работы используется во всех сварочных полуавтоматах и частично в сварочных автоматах, преимущественно с ПВ = 60 %.

Перемежающийся режим — режим работы электротехнического устройства (в том числе сварочного), при котором работа с неизменной нагрузкой чередуется с работой в режиме холостого хода в случаях, когда продолжительность работы не настолько длительна, чтобы при неизменной температуре охлаждающей среды температура электротехнического устройства могла достигнуть установившегося значения.

Перемежающийся номинальный режим работы характеризуется относительной (в процентах) продолжительностью нагрузки (ПН), определяемой по формуле

$$\text{ПН} = \frac{N}{N+V} 100, \qquad (1.2)$$

где N — время работы; V — время холостого хода.

Очевидно, что во время холостого хода электротехническое устройство не отключается от питающей сети.

Перемежающийся режим работы используется в сварочных устройствах для ручной сварки штучным электродом.

1.3. УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ, ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ И ХРАНЕНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ

В соответствии с ГОСТ 15150—69 изделия, в том числе электросварочное оборудование, изготовляются для эксплуатации в определенных климатических условиях.

Основными характеристиками климатических условий эксплуатации электротехнических изделий являются температура окружающего воздуха, относительная влажность, солнечное излучение, атмосферное давление, содержание в авмосфере коррозионноактивных агентов. Исполнение изделий для эксплуатации в определенных климатических районах обозначается буквами, а категории размещения изделий, определяющие температуру, влажность, наличие или отсутствие прямого воздействия солнечного излучения, атмосферных осадков и т. п., — арабскими цифрами. По содержанию в атмосфере коррозионноактивных агентов устанавливаются типы атмосфер I, II, III, IV. Электросварочное оборудование изготовляется по типу II — промышленная атмосфера.

К микроклиматическому району с умеренным климатом (У), для которого, как правило, изготовляется электросварочное оборудование общего назначения, относятся районы, где средняя из ежегодных абсолютных максимальных температур воздуха равна или ниже плюс 40 °С, а средняя из ежегодных абсолютных минимальных температур равна или выше минус 45 °С. Необходимо отметить, что ГОСТ 15150—69 допускает сужение диапазона температур, при которых эксплуатируется изделие.

К микроклиматическому району с холодным климатом (УХЛ), для которого могут изготовляться некоторые типы сварочных агрегатов, относятся районы, в которых средняя из ежегодных абсолютных минимальных температур воздуха ниже минус 45 °С. Границы этого района на территории СССР приведены в приложении ГОСТ 15150—69.

Электросварочное оборудование изготовляется по четырем категориям размещения. По категории 4 оборудование должно эксплуатироваться в закрытых помещениях с искусственно регулируемыми климатическими условиями. По категории 3 оборудование должно эксплуатироваться в закрытых помещениях, но с естественной вентиляцией, без искусственно регулируемых климатических условий. По категории 2 оборудование может эксплуатироваться в помещениях, где колебания температуры и влажности воздуха несущественно от-

личаются от колебаний температуры и влажности наружного воздуха и имеется сравнительно свободный доступ наружного воздуха. По категории 1 оборудование может эксплуатироваться на открытом воздухе.

ГОСТ 15150—69 кроме условий эксплуатации определяет климатические условия транспортирования и хранения изделий — температуру воздуха, относительную влажность воздуха, солнечное излучение, интенсивность дождя и наличие плесневых и дереворазрушающих грибов. Эти факторы увязаны с типом атмосферы и образуют девять групп со своими обозначениями. Для изделий, транспортируемых в закрытом транспорте (в том числе для электросварочного оборудования), условия транспортирования те же, что и условия хранения.

Кроме климатических условий ГОСТ 17516—72 и ГОСТ 23216—78 определяют условия эксплуатации и транспортирования в зависимости от воздействия механических факторов — ударов, вибрации при эксплуатации, а также от вида дорог при транспортировании с допустимым числом перегрузок. В табл. 1.1 приведены обозначения условий эксплуатации, транспортирования и хранения электросварочного оборудования, а также допустимые величины основных факторов воздействия.

Срок сохраняемости до переконсервации для агрегатов, преобразователей и трансформаторов для автоматической сварки — 1 год, для остальных видов оборудования — 2 года.

1.4. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

Классификация помещений по опасности поражения людей электрическим током. В соответствии с Правилами устройства электроустановок (ПУЭ—85) устанавливаются следующие категории помещений.

Помещения с повышенной опасностью характеризуются наличием в них одного из следующих условий, создающих повышенную опасность:

сырость (относительная влажность помещений длительно превышает 75 %);

токопроводящие полы (металлические, земляные, железобетонные, кирпичные и т. п.);

запыленность проводящей пылью (количество пыли таково, что она оседает на проводах и проникает внутрь электросварочного оборудования);

возможность одновременного прикосновения человека к заземленным металлоконструкциям и металлическим частям электросварочного оборудования.

Особо опасные помещения характеризуются наличием одного из следующих условий, создающих особую опасность:

особая сырость (относительная влажность помещений близка к 100 % — потолок, стены, пол и предметы, находящиеся в помещении, покрыты влагой);

химически активная среда (в помещении по условиям производства постоянно или длительное время содержатся пары или образуются отложения, разрушающие изоляцию и токоведущие части электросварочного оборудования);

одновременное наличие двух или более условий повышенной опасности.

Вид оборудования	Климатические					
	при эксплуатации			при транспортировании		
	Климатическое исполнение и категория размещения по ГОСТ 15150—69	Диапазон температур, °С	Среднемесячная относительная влажность, %	Условия транспортирования по ГОСТ 15150—69	Диапазон температур, °С	Среднемесячная относительная влажность, %
Полуавтоматы без водяного охлаждения по ГОСТ 18130—79	У3	+40... —10	80 при 20 °С	7 (Ж1)	+50... —50	80 при 20 °С
Полуавтоматы с водяным охлаждением по ГОСТ 18130—79	УХЛ4	+35... +1	65 при 20 °С			
Автоматы без водяного охлаждения по ГОСТ 8213—75	У3	+40... —10	80 при 20 °С			
Автоматы с водяным охлаждением по ГОСТ 8213—75	УХЛ4	+35... +1	65 при 20 °С			
Агрегаты с двигателями внутреннего сгорания по ГОСТ 2402—82	У1	+40... —45	80 при 20° С	8 (ОЖ3)		
Преобразователи по ГОСТ 7337—82	У2			7 (Ж1)		

Таблица 1.1

Климатические факторы			Механические факторы			
при хранении			при эксплуатации		при транспортировании	
Условия хранения по ГОСТ 15150—69	Диапазон температур, °С	Среднемесячная относительная влажность, %	Группа по ГОСТ 17516—72	Вид воздействия	Группа по ГОСТ 23216—78	Вид воздействия
1 (Л)	+40... +5	65 при 20 °С	М23	Многократные удары с ускорением 8g и длительностью 2—15 мс	С	Перевозки различными видами транспорта с числом перегрузок не более 4
			М9	Вибрации с ускорением 2g в диапазоне частот 1—60 Гц и многократные удары с длительностью 2—15 мс		
			М18	Вибрации с ускорением 0,5g в диапазоне частот 1—35 Гц и многократные удары с ускорением 15g и длительностью 2—15 мс	Л	Перевозки различными видами транспорта с числом перегрузок не более 2
			М20	Многократные удары с ускорением 15g и длительностью 2—15 мс		

Вид оборудования	Климатические					
	при эксплуатации			при транспортировании		
	Климатическое исполнение и категория размещения по ГОСТ 15150—69	Диапазон температур, °С	Среднемесячная относительная влажность, %	Условия транспортирования по ГОСТ 15150—69	Диапазон температур, °С	Среднемесячная относительная влажность, %
Трансформаторы для автоматической сварки под флюсом по ГОСТ 7012—77	У3	+40...—10	80 при 20 °С	7 (Ж1)	+50...—50	80 при 20 °С
Трансформаторы для ручной сварки по ГОСТ 95—77						
Выпрямители для ручной и полуавтоматической сварки под флюсом по ГОСТ 13821—77 *						
Установки для сварки неплавящимся (вольфрамовым) электродом по ТУ 16—739.30—82 и ТУ 16 539.073—78	УХЛ4	+35...+1	65 при 20 °С			

* Выпрямители для сварки в среде активных и инертных газов, тации, транспортирования и хранения в зависимости от воздействия

Продолжение табл. 1.1

факторы			Механические факторы			
при хранении			при эксплуатации		при транспортировании	
Условия хранения по ГОСТ 15150—69	Диапазон температур, °С	Среднемесячная относительная влажность, %	Группа по ГОСТ 17516—72	Вид воздействия	Группа по ГОСТ 23216—78	Вид воздействия
1 (Л)	+40... +5	65 при 20 °С	М1	Вибрации с ускорением 0,5 *g* в диапазоне частот 1—35 Гц	Л	Перевозки различными видами транспорта с числом перегрузок не более 2
			М20	Многократные удары с ускорением 15*g* и длительностью 2—15 мс	С	Перевозки различными видами транспорта с числом перегрузок не более 4
			М1	Вибрации с ускорением 0,5*g* в диапазоне частот 1—35 Гц		

не подпадающие под ГОСТ 13821—77, имеют те же условия эксплуа-климатических и механических факторов внешней среды.

Помещения без повышенной опасности характеризуются отсутствием условий, создающих повышенную и особую опасность.

Электросварочное оборудование для дуговой сварки работает в помещениях всех трех категорий. В особо опасных помещениях в случае применения ручной дуговой сварки переменным током сварочные трансформаторы должны иметь ограничители напряжения холостого хода (ГОСТ 12.2.007.8—75).

Требования к помещениям для электросварочных установок и сварочных постов. В соответствии с ПУЭ—85, гл. IV-6 помещения, в которых размещаются электросварочные установки, должны отвечать требованиям действующих стандартов, санитарных правил, противопожарных инструкций, а также СНиП.

Сварочное производство по степени пожарной безопасности относится к категориии «Г», за исключением производств с электросварочными установками, использующими газы (например, водород), образующие с воздухом взрывоопасные смеси.

Помещения, предназначенные для постоянных электросварочных работ, должны быть вентилируемыми, со стенами из несгораемых материалов.

Во взрыво- и пожароопасных зонах можно проводить только временные, несистематические электросварочные работы с обязательным соблюдением положений и инструкций, согласованных с ГУПО МВД СССР и утвержденных Госгортехнадзором СССР.

Высота ограждений, выполненных из несгораемых материалов, должна быть не менее 1,8 м.

Площадь отдельного помещения для электросварочных работ должна быть не менее 10 м^2; площадь, свободная от оборудования и материалов, должна быть не менее 3 м^2 на каждый сварочный пост.

Кабины в непожароопасных цехах для систематического выполнения ручной дуговой сварки или сварки в среде защитных газов должны иметь стенки из несгораемых материалов. Глубина кабины должна быть не менее двойной длины, а ширина — не менее полуторной ширины свариваемых изделий, однако площадь кабины должна быть не менее $2\times1{,}5$ м^2. При установке источника сварочного тока в кабине ее размеры должны быть соответственно увеличены. Высота стенок кабины должна быть не менее 2 м, зазор между стенками и полом — 50 мм, а при сварке в среде защитных газов — 300 мм.

В случае движения над кабиной мостового крана, верх кабины закрывается сеткой с ячейками размером не более 50×50 мм.

Ширина проходов (в метрах), обеспечивающих безопасность и удобство проведения электросварочных работ, должна быть не менее указанной ниже:

Между однопостовыми источниками сварочного тока	0,8
Между многопостовыми источниками сварочного тока	1,5
Между группами сварочных трансформаторов	1,0
У стеллажей для выполнения ручных сварочных работ на крупных деталях и конструкциях	1,0
У столов для выполнения ручных сварочных работ на мелких деталях	1,0
Вокруг установок для автоматической дуговой сварки под флюсом крупных изделий, установок для дуговой сварки в среде защитных газов и плазменной сварки	1,5
В сварочной мастерской или цехе проходы устанавливаются в зависимости от числа работающих, но не менее	1,0

Допустимые расстояния (в метрах) между сварочным оборудованием должны быть не менее приведенных ниже:

От однопостовых и многопостовых источников сварочного тока до стен	1,0
Между сварочными трансформаторами, стоящими рядом в одной группе	0,1
Между сварочными трансформаторами и ацетиленовым баллоном	3,0
Между сварочными проводами и трубопроводом кислорода	0,5
Между сварочными проводами и трубопроводом ацетилена или других горючих газов	1,0

Условия труда при процессах дуговой сварки. Условия труда — это комплекс факторов производственной среды и рабочей зоны, которые при выполнении сварочного процесса оказывают воздействие на здоровье работающего и производительность труда.

Среди сварочных работ в современном производстве широко применяется ручная и полуавтоматическая сварка (в пределах 80—85 % общего числа сварок), включая сварку в углекислом газе. Применяется ручная сварка плавящимся и неплавящимся электродами в аргоне и в смеси углекислого газа и аргона, сварка под флюсом.

В процессе горения сварочных материалов образуются аэрозоли (пыль и газы), в состав которых входит в наибольшем количестве железо, являющееся малоопасным веществом (IV класс опасности по ГОСТ 12.1.005—76), и вещества, чрезвычайно опасные (I класс): аэрозоли конденсации марганца и хрома, озон, а также вещества высокоопасные (II класс): аэрозоли конденсации никеля, окислы азота, фтористый водород. Например, при сварке в углекислом газе (ток 500 А) на 1 кг израсходованной проволоки Св-08Г2С диаметром 2,0 мм выделяется 0,4 г/кг марганца, 0,5 г/кг окиси кремния, 4,2 г/кг окислов железа. Из газов выделяется 2,9 г/кг окиси углерода, 0,7 г/кг окислов азота, 1,2 г/кг углекислого газа. Озона нет. Концентрация вредных веществ на расстоянии 200—500 мм от сварочной дуги значительно превышает нормы предельно допустимых концентраций (ПДК).

При сварке под флюсом ОСЦ-45 (ток 500 А) на 1 кг израсходованной проволоки Св-08 А диаметром 2,0 мм выделяется 0,006 г/кг марганца, 0,003 г/кг окиси алюминия, 0,011 г/кг растворимых фторидов и 0,001 г/кг нерастворимых. Из газов выделяется 1,1 г/кг окиси углерода и 0,00006 г/кг фтористого водорода. Озона нет. Концентрация сварочной пыли на расстоянии 200—300 мм от сварочной дуги превышает нормы ПДК в 1,5—2,0 раза, окиси углерода — в 6—20 раз, фтористого водорода — в 2—4 раза. Эффективным способом снижения количества сварочных аэрозолей в рабочей зоне является использование местной вытяжной вентиляции, которая выполняется по трем основным схемам:

местные отсосы, встроенные в сварочные полуавтоматы, автоматы, роботы или пристроенные к ним, расположенные на расстоянии 30—60 мм от дуги и перемещающиеся вместе со сварочной горелкой;

местные отсосы, встроенные в технологическую оснастку;

внешние отсосы, не связанные со сварочно-технологическим оборудованием, расположенные на расстоянии 200—500 мм от сварочной дуги.

Таблица 1.2

Вид сварки	Воздухообмен на 1 кг материала, м³		
	минимальный	максимальный	средний
Сварка электродами общего назначения:			
углеродистые и низколегированные стали	8 400	68 000	29 000
теплостойкие стали	62 000	280 000	170 000
жаропрочные стали и сплавы	34 000	89 000	63 000
коррозионные стали	65 000	92 000	73 000
высокопрочные среднелегированные стали аустенитного класса	56 000	102 000	76 000
оцинкованные стали	150 000	350 000	250 000
наплавка сталей и чугуна	41 000	110 000	56 000
Полуавтоматическая сварка в углекислом газе:			
проволока Св-08Х19Н11М3			64 000
» Св-06Х16Н25М6			180 000
» Св-08Г2С			12 000
	—	—	
Сварка в смеси углекислого газа, аргона и кислорода:			
проволока Св-08Г2С диаметром 2 мм			2 400
Сварка алюминия и его сплавов в аргоне и гелии	2 400	28 000	12 500
Сварка или наплавка под плавленными и керамическими флюсами	240	1 400	600

При сварке коротких швов с большой протяженностью перемещений сварочной головки первый вариант отсосов, безусловно, предпочтителен.

Поступая в окружающую воздушную среду, вредные вещества загрязняют до уровня ПДК значительные объемы воздуха (табл. 1.2). Из табл. 1.2 видно, что расход 1 кг сварочного материала практически при всех процессах сварки, кроме сварки под флюсом и некоторых других ее видов, приводит к загрязнению 10 000 м³ воздуха.

Все виды сварочных и плазменных процессов сопровождаются излучением в оптическом диапазоне электромагнитных волн (0,2—3,5 мкм). Если процессы ручной дуговой сварки сопровождаются практически излучением только в видимой и инфракрасной зоне опти-

ческого диапазона, то механизированные процессы электродуговой сварки металлов являются источниками коротковолнового ультрафиолетового излучения (0,2—0,4 мкм). Эти различия связаны с видом режима процесса, типом оборудования, применяемыми основными и присадочными материалами, диаметром и составом проволок и электродов, составом покрытий и защитных газов.

Важное значение для защиты от излучения сварочной дуги имеют размещение рабочего места, расстояние от источника излучения, эффективность его укрытия и адекватность применяемой спецодежды и средств индивидуальной защиты.

Сварку на открытом воздухе выполняют только после устройства навеса, защищающего место сварки от атмосферных осадков. Переносные щиты и ширмы следует изготовлять с таким расчетом, чтобы их установка не вызывала затруднений. Они должны быть легкими, из тонкой листовой стали, асбестового полотна, брезента или фанеры.

Внутри емкостей сварку можно выполнять только при открытых люках и эффективной приточно-вытяжной вентиляции. При этом вне емкости должен находиться наблюдающий, готовый оказать сварщику немедленную помощь.

Работа на расстоянии 1,5 м и более над полом рассматривается как работа на высоте, и в этих случаях необходимо оборудовать леса или подмостки. В ряде отраслей зачастую не удается избежать одновременной работы нескольких сварщиков в двух и более ярусах по вертикали. В этих условиях монтируют защитные устройства — глухие настилы, которые защищают находящихся внизу рабочих от брызг металла, падающих огарков электродов и других предметов.

При автоматической сварке в среде защитных газов сварочная головка со стороны оператора должна закрываться щитком размером 200×200 мм со светофильтром. При сварке в среде защитных газов существует опасность травмирования при эксплуатации баллонов с газами.

К обслуживанию контейнеров с сжиженным газом, а также рамповой системы подачи газа к сварочным постам допускаются лица, имеющие соответствующее удостоверение Госкотлотехнадзора СССР.

Действующее трудовое законодательство не допускает к сварочным работам лиц моложе 18 лет и предусматривает ряд льгот для рабочих, занятых на сварке. Сварщикам предоставляется дополнительный отпуск до 12 рабочих дней. Выдается бесплатная спецодежда, спецобувь, предохранительные и защитные устройства. Брюки должны быть гладкими и не иметь внизу отворотов, надевать их надо с напуском на обувь. Наружные карманы куртки должны закрываться клапанами. При электродуговой сварке потолочных швов или полуавтоматической сварке в среде углекислого газа, чтобы искры не попали в рукава, кроме обычной спецодежды надо надевать асбестовые нарукавники, плотно завязывая их у локтей, или рукавицы с удлиненными манжетами (крагами). В настоящее время разработана модель облегченного костюма для электросварщиков из брезента с лавсаном и накладками из спилка, что придает костюму большую эластичность и огнестойкость. Применяемая на производстве обувь должна отвечать требованиям гигиены и техники безопасности. Наиболее подходящей обувью являются ботинки без шнурков, с резинкой, расположенной сбоку, или застежкой сзади, с гладким верхом. С гладкой поверхности обуви брызги расплавленного металла скатываются на пол и не задерживаются на ней. Для защиты стопы от травм обувь должна быть с твердым носком за счет металлической пластинки.

На голову обязательно следует надевать берет или каску в зависимости от места работы.

При ручной сварке изделий с подогревом сварщики должны быть обеспечены обувью с толстой теплоизолирующей подошвой.

Рабочие места со стороны конструкции покрываются асбестовой тканью, а затем войлочными листами.

При сварке электродами диаметром более 6 мм кисти рук должны быть защищены от воздействия теплового излучения рукавицами с дополнительной войлочной прокладкой.

Если сварщику приходится работать лежа или стоя на коленях на металлической поверхности, надо применять от поражения электрическим током резиновые коврики, наколенники и налокотники из войлока, а также резиновую обувь.

Чаще всего причиной обращения сварщиков за медицинской помощью является травмирование, при этом возможны засорение или ранение глаз, ожоги, ушибы и ранения тела. Кожные покровы и глаза сварщика необходимо защищать от воздействия лучей дуги. Кожные покровы тела защищает рабочая одежда, лицо защищается щитком, кисти рук — рукавицами, глаза — светофильтрами, помещенными в щиток, органы слуха — наушниками, вкладышами, шлемами, органы дыхания — средствами индивидуальной защиты.

Рекомендации по выбору средств индивидуальной защиты разработаны и даны секцией XIII координационного Совета по сварке СССР.

Перечень нормативных документов по безопасности труда приведен в приложении 3.

Классы электротехнических изделий по способу защиты человека от поражения электрическим током. ГОСТ 12.2.007.0—75 устанавливает пять классов защиты: 0; 0I; I; II; III.

К классу 0 относятся изделия, имеющие, по крайней мере, рабочую изоляцию и не имеющие элементов для заземления, если эти изделия не отнесены к классу II или III. Все передвижные электросварочные агрегаты с двигателями внутреннего сгорания отнесены к классу 0. Это определяется п. 3.3.1 того же стандарта и п. УП-6-27 «Правил устройств электроустановок» (ПУЭ), поскольку напряжение сварочного генератора не превышает 110 В, а в случае установки вспомогательного генератора с напряжением 220 В он снабжается устройством контроля изоляции и защитного отключения.

К классу 0I относятся изделия, имеющие, по крайней мере, рабочую изоляцию, элемент для заземления и провод без заземляющей жилы для присоединения к источнику питания (сети).

К классу I относятся изделия, имеющие, по крайней мере, рабочую изоляцию и элемент для заземления. В случае если изделие класса I имеет провод для присоединения к источнику питания (сети), у этого провода должна быть заземляющая жила и вилка с заземляющим контактом. Трансформаторы для ручной дуговой сварки, трансформаторы для автоматической сварки под флюсом, выпрямители для ручной, полуавтоматической и автоматической сварки могут изготовляться как по классу 0I, так и по классу I.

К классу II относятся изделия, имеющие двойную изоляцию или усиленную изоляцию и не имеющие элементов для заземления. По этому классу изготовляются бытовые сварочные устройства, так как бытовая сеть не имеет, как правило, линии заземления.

К классу III относятся изделия, не имеющие ни внутренних, ни внешних электрических цепей с напряжением выше 42 В. По этому классу электросварочное оборудование не изготовляется.

Таблица 1.3

Первая цифра	Степень защиты	
	Краткое описание	Определение
0	Защита отсутствует	Специальная защита отсутствует
1	Защита от твердых тел размером более 50 мм	Защита от прикосновения к частям внутри оболочки большого участка поверхности человеческого тела, например руки, от проникновения твердых тел размером свыше 50 мм
2	Защита от твердых тел размером более 12 мм	Защита от попадания внутрь оболочки пальцев или предметов длиной не более 50 мм и от проникновения твердых тел размером свыше 12 мм
3	Защита от твердых тел размером более 2,5 мм	Защита от попадания внутрь оболочки инструментов, проволоки диаметром или толщиной более 2,5 мм и от проникновения твердых тел размером более 2,5 мм

Указанные классы защиты устанавливают способы подключения изделия к питающей сети, поэтому автоматы и полуавтоматы общего назначения, не имеющие отдельных шкафов управления и питаемые от источников сварочного тока, к какому-либо классу защиты не отнесены.

ГОСТ 12.1.009—76 определяет следующие типы изоляции:

Рабочая изоляция — электрическая изоляция токоведущих частей электроустановки, обеспечивающая ее нормальную работу и защиту персонала от поражения электрическим током.

Дополнительная изоляция — электрическая изоляция, предусмотренная дополнительно к рабочей изоляции для защиты от поражения электрическим током в случае повреждения рабочей изоляции.

Двойная изоляция — электрическая изоляция, состоящая из рабочей и дополнительной изоляции.

Усиленная изоляция — улучшенная рабочая изоляция, обеспечивающая такую же степень защиты от поражения электрическим током, как и двойная изоляция.

Степень защиты. В отличие от класса защиты степень защиты устанавливает требования к оболочкам, обеспечивающим защиту персонала от прикосновения к частям, находящимся под напряжением, или движущимся частям, находящимся внутри оболочки, а также защиту изделия от попадания внутрь твердых тел и воды (ГОСТ 14254—80).

Для обозначения степени защиты применяются буквы IP (индекс защиты) и две цифры. Значение и расшифровка первой цифры, обозначающей степень защиты персонала от соприкосновения с находящимися под напряжением частями или приближения к ним, от соприкосновения с движущимися частями, расположенными внутри оболочки, а также степень защиты изделий от попадания внутрь твердых посторонних тел указаны в табл. 1.3.

Таблица 1.4

Вторая цифра	Степень защиты	
	Краткое описание	Определение
0	Защита отсутствует	Специальная защита отсутствует
1	Защита от капель воды	Капли воды, вертикально падающие на оболочку, не должны оказывать вредного действия на изделие
2	Защита от капель воды при наклоне до 15°	Капли воды, вертикально падающие на оболочку, не должны оказывать вредного действия на изделие при наклоне его оболочки на любой угол до 15° относительно нормального положения
3	Защита от дождя	Дождь, падающий на оболочку под углом 60° от вертикали, не должен оказывать вредного действия на изделие

Вторая цифра обозначает степень защиты изделия от попадания воды. Значение и расшифровка этой цифры указаны в табл. 1.4.

В табл. 1.3 и 1.4 приведены только те степени защиты, которые используются в оборудовании для дуговой сварки общего назначения.

ГОСТ 12.2.007.8—75 «Устройства электросварочные и для плазменной обработки. Требования безопасности» устанавливает для источников сварочного тока и шкафов управления, работающих в закрытых помещениях, минимальную степень защиты IP11, а для того же оборудования на открытом воздухе под навесом — IP21. Практически же трансформаторы для ручной дуговой сварки, выпрямители для ручной, полуавтоматической и автоматической сварки, агрегаты имеют степень защиты IP22, а трансформаторы для автоматической сварки под флюсом — IP21. В каждом конкретном электросварочном устройстве выполнение требований по степени защиты сводится к выбору отверстий (жалюзей) охлаждения соответственно первой цифре обозначения и выбору угла их наклона соответственно второй цифре. Здесь необходимо отметить, что требования по степени защиты не распространяются на зажимы сварочной цепи устройств и на устройства, которые не могут находиться под напряжением свыше 42 В переменного тока или 110 В постоянного тока, а также на нижнюю часть устройств массой более 50 кг.

У тяжелых трансформаторов и выпрямителей на токи 1000 А и более сварочные зажимы не защищены. Выпрямители имеют напряжение холостого хода ниже 110 В и поэтому не требуют защиты, а трансформаторы для автоматической сварки, выпускаемые с 1981 г., имеют защитное отключение при появлении на сварочных зажимах напряжения холостого хода во время проведения настроечных работ. Нижняя часть устройств не требует защиты, так как государственные стандарты на конкретный вид сварочного оборудования устанавливают ее местоположение под корпусом изделия. Здесь еще раз необходимо подчеркнуть, что все оговариваемые меры по соблюдению в конструкциях оборудования и при его эксплуатации требований тех-

ники безопасности в общем случае не относятся к оборудованию, имеющему напряжение ниже 42 В переменного тока и 110 В постоянного тока. К специальному оборудованию могут предъявляться более жесткие требования по значению допустимых безопасных напряжений, например к источникам сварочного тока, работающим в шахтах, рудниках, под водой, в космосе.

Требования к защитному заземлению. Выполнение требований по заземлению электросварочных устройств является, по существу, важнейшим условием безопасной работы.

Все электросварочное оборудование, изготовляемое по классам защиты человека от поражения электрическим током 0I и I, имеет элемент заземления. Требования к конструкции элемента заземления обусловливаются ГОСТ 12.2.007.0—75. Как правило, элемент заземления выполняется как металлическая площадка, защищенная каким-либо способом от коррозии, с расположенным на ней болтом. Выполнение заземления должно производиться в строгом соответствии с «Правилами устройства электроустановок» (ПУЭ), «Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителем» и «Правилами техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителем» (ПТЭ и ПТБ).

Ниже приводятся некоторые наиболее важные требования этих Правил.

1. В электросварочных установках кроме заземления (зануления) корпусов и других металлических нетоковедущих частей оборудования, как правило, предусматривается заземление одного из зажимов вторичной обмотки сварочного трансформатора, выпрямителя, преобразователя. Для этой цели в трансформаторах имеется элемент заземления на одном из сварочных зажимов, а в выпрямителях и преобразователях — на обоих сварочных зажимах, поскольку сварка постоянным током может производиться током как прямой, так и обратной полярности. Выполнение этого заземления является обязательным, так как оно защищает сварщика от поражения электрическим током при пробое первичной обмотки, соединенной с питающей сетью, на вторичную, соединенную с электрододержателем, находящимся в руке сварщика.

2. Не допускается последовательное включение в заземляющий провод нескольких заземляемых корпусов оборудования, так как нарушение контакта в какой-либо части заземляющей цепи приведет к отсутствию заземления оборудования, отстоящего от этой части в направлении от земли.

3. Не допускается использование сварочного провода, подключаемого к изделию, в качестве заземляющего провода, так же как и использование для заземления коммуникаций и несварочного технологического оборудования. Из формулировки этого требования ясно, что эти меры не гарантируют нормального контакта в сети заземления.

4. При сварке одного изделия двумя или более дугами источники сварочного тока должны включаться синфазно. Это требование относится как к источникам переменного тока, так и к источникам постоянного тока. Оно отсутствует в ПТЭ, ПТБ и ПУЭ.

Допустимые напряжения холостого хода источников сварочного тока для дуговой сварки. ГОСТ 12.2.007.8—75 системы стандартов по безопасности устанавливает следующие допустимые значения напряжений холостого хода источников сварочного тока для дуговой сварки (стандарт не распространяется на оборудование, предназна-

Таблица 1.5

Цвет проводов (трубки)	Условное обозначение	
	буквенное	цифровое
Оранжевый	О	0
Синий или голубой	С	2
Красный или розовый	К	1
Зеленый	З	3
Черный	Ч	4
Белый или бесцветный	Б	5
Желтый	Ж	6
Фиолетовый	Ф	7
Коричневый или бежевый	Кч	8
Серый	Ср	9
Зелено-желтый	Зж	36

ченное для эксплуатации его под водой, в шахтах, рудниках и космосе):

80 В* (эффективное значение) — для источников переменного тока для ручной дуговой сварки;

140 В* (эффективное значение) — для источников переменного тока для автоматической дуговой сварки;

100 В (среднее значение) — для источников постоянного тока.

Предупредительная сигнализация. При достижении критических режимов, возникновении аварийной ситуации и для общей характеристики состояния работающего электросварочного оборудования применяется звуковая и световая сигнализация.

Звуковая сигнализация в виде звонков, зуммеров, сирен и гудков в основном используется для оповещения о наступлении критических и аварийных режимов и о начале и конце технологических циклов.

Световая сигнализация более информативна, она различается по цветовой окраске, может иметь непрерывное и для более сильного восприятия импульсное свечение.

В соответствии с ГОСТ 12.2.007.0—75 применяются следующие цвета световой сигнализации:

Красный свет — запрещающие и аварийные сигналы, предупреждение о перегрузках, неправильных действиях, опасности, состояниях, требующих немедленного вмешательства, и т. п.

Желтый свет — сигнал привлечения внимания (достижение предельных значений, переход на автоматический режим) и т. п.

---

* Источники переменного тока для автоматической дуговой сварки с напряжением холостого хода выше 80 В, а также источники переменного тока для ручной дуговой сварки, используемые для работы в особо опасных условиях (внутри металлических емкостей, на открытом воздухе и в особо опасных помещениях), должны снабжаться ограничителями напряжения холостого хода.

Таблица 1.6

Функциональное назначение электрических сетей	Цвет провода	
	основной	заменитель
Силовые цепи	Черный	Фиолетовый
Цепи управления, измерения и сигнализации переменного тока	Красный	Розовый
То же постоянного тока	Синий	—
Защитные цепи и цепи заземления	Зелено-желтый	—
Нулевые провода	Голубой	—

Зеленый свет — сигнал безопасности (нормальный режим работы оборудования, разрешение на начало действия) и т. п.

Белый свет — сигнал включенного состояния автомата, когда нерационально применение красного, желтого и зеленого цветов.

Синий свет — для специальных случаев, когда нельзя применить красный, желтый, зеленый и белый цвета.

Все светосигнальные устройства обязательно должны иметь символические знаки или надписи, указывающие назначение сигнала.

В стационарном электросварочном оборудовании широко применяется предохранительное светосигнальное устройство УСП-2У3, предназначенное для сигнализации о наличии напряжения между любым из трехфазных проводов сети или между любым из трехфазных проводов и нулевым проводом при четырехпроводной сети при нормальном напряжении до 500 В и частоте 50 Гц. Устройство монтируется внутри шкафов управления или корпусов оборудования и сигнализирует о наличии напряжения на входных зажимах.

Маркировка и различительная окраска. С целью улучшения техники безопасности, упрощения монтажно-наладочных работ, ускорения поиска неисправностей в электросварочных установках должна быть обеспечена возможность легкого и быстрого распознавания шин, проводов, элементов монтажа и по их функциональному назначению. Для этого применяется маркировка и различительная окраска. Маркировка элементов монтажа должна выполняться в строгом соответствии с принципиальной электрической схемой. Маркировка может быть цветовая, цифровая, буквенная и буквенно-цифровая.

ГОСТ 12.2.007.0—75, ПУЭ и ОСТ 160.684.032—81 устанавливают следующие цвета маркировки и различительной окраски.

При переменном токе шины должны быть окрашены: фаза *А* — в желтый цвет, фаза *В* — в зеленый цвет, фаза *С* — в красный цвет. Нулевые шины при изолированной нейтрали должны иметь белый цвет, при заземленной нейтрали — черный цвет.

Открыто проложенные заземляющие проводники, а также все конструкции, провода и полосы заземления должны быть окрашены в черный цвет.

При однофазном токе проводник, присоединенный к началу обмотки источника питания, должен быть окрашен в желтый цвет, при-

Таблица 1.7

Приборы	Выводы от элементов прибора	Цвет проводов (трубки)	
		основной	заменитель
Полупроводниковые транзисторы	От эмиттера	Зеленый	Желтый, синий
	От коллектора	Красный	Розовый
	От базы	Белый	Бесцветный
	От корпуса	Черный	Фиолетовый
Полевые транзисторы	От затвора	Зеленый	Желтый, синий
	От стока	Красный	Розовый
	От истока	Белый	Бесцветный
	От корпуса	Черный	Фиолетовый
Тиристоры	От анода (+)	Красный	Розовый
	От катода (—)	Зеленый	Желтый, синий
	От управляющего электрода	Белый	Бесцветный
Электровакуумные приборы	От анода	Красный	Розовый
	От 1-й сетки	Белый	Бесцветный
	От 2-й сетки	Коричневый	Бежевый
	От 3-й сетки	Белый	Бесцветный
	От катода	Зеленый	Желтый
	От накала	Синий	Голубой

соединенный к концу обмотки — в красный цвет. Шины однофазного тока, если они являются ответвлениями от шин трехфазного тока, окрашиваются в соответствующие цвета.

При постоянном токе положительная шина (+) окрашивается в красный цвет, отрицательная шина (—) — в синий цвет, нейтральная шина — в белый цвет.

Условные обозначения цветовой маркировки проводов указаны в табл. 1.5.

Цветовая маркировка проводов в зависимости от функционального назначения приведена в табл. 1.6.

Цветовая маркировка выводов полупроводниковых и электровакуумных приборов приведена в табл. 1.7.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ПОЛУАВТОМАТЫ И АВТОМАТЫ ДЛЯ СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ В СРЕДЕ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА И ПОД ФЛЮСОМ

2.1. КЛАССИФИКАЦИЯ

Основным исполнением полуавтоматов является исполнение по способу защиты зоны дуги:

для сварки в активных защитных газах (Г);
для сварки в инертных газах (И);
для сварки в активных и инертных газах (У);
для сварки под флюсом (Ф);
для сварки открытой дугой (О).

Имеются исполнения по виду проволоки, по способу охлаждения горелки, по способу регулирования скорости подачи электродной проволоки, по способу подачи электродной проволоки, по конструктивному исполнению. Все исполнения, кроме исполнений по способу защиты зоны дуги, в обозначения полуавтомата не входят.

Основным исполнением автоматов также является исполнение по способу защиты зоны дуги:

для сварки в защитных газах (Г);
для сварки под флюсом (Ф);
для сварки в защитных газах и под флюсом (ФГ);
для сварки открытой дугой (О).

Остальные исполнения — по роду тока, по способу охлаждения токоподвода и сопла, по способу регулирования скорости подачи электродной проволоки, по способу регулирования скорости сварки, по способу подачи электродной проволоки, по конструктивному исполнению. Все исполнения, кроме исполнений по способу защиты зоны дуги, в обозначения автоматов также не входят.

2.2. ТРЕБОВАНИЯ К УЗЛАМ

Системы подачи электродной проволоки. Различают три основные системы подачи электродной проволоки: а) толкающего типа; б) тянуще-толкающего типа; в) тянущего типа.

На рис. 2.1 приведены все три системы, где *1* — кассетное устройство; *2* — двигатель-редуктор; *3* — подающие ролики; *4* — направляющий канал; *5* — горелка.

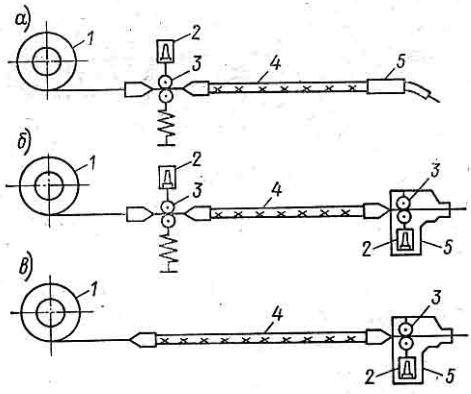


Рис. 2.1. Системы подачи электродной проволоки

Система подачи толкающего типа (рис. 2.1, *а*) является наиболее распространенной и используется во всех полуавтоматах, выпускаемых отечественной промышленностью. К недостаткам этой системы относятся ограничение длины (до 3 м) шланга, изгиб проволоки в направляющем канале, невозможность подачи проволоки малого диаметра и значительные усилия в механизмах подачи. Преимуществами являются простота устройства, небольшие размеры и масса горелки, которые служат основными критериями для оператора-сварщика.

Система подачи тянуще-толкающего типа (рис. 2.1, *б*) — комбинационная, усилия в ней минимальны. Такая система может быть использована для подачи тонких (диаметром менее 1 мм) проволок на значительное (до 10—20 м) расстояние. Однако горелка в такой системе имеет большую массу и габариты. При отсутствии в системе полной синхронизации используют один двигатель с постоянным моментом (толкающий), а другой — с постоянной скоростью (тянущий).

В системе подачи тянущего типа (рис. 2.1, *в*) к электродной проволоке приложена сила натяжения и она не изгибается в направляющем канале, но при скручивании канала существует опасность разрыва проволоки. Горелка в этой системе имеет значительные размеры и массу. На рис. 2.2 дана зависимость усилий подачи электродной проволоки диаметром 1,2 мм по шлангу длиной 3 м от угла скручивания θ.

Одним из наиболее существенных требований, предъявляемых к конструкции толкающей системы, является значение тянущего усилия, проталкивающего электродную проволоку в зону дуги. Исключением могут быть механизмы подачи, которые сообщают проволоке, кроме непрерывного поступательного, еще какое-либо движение. Примером таких устройств может служить механизм подачи, построенный по планетарному принципу, типа «Изаплан» (НРБ), где электродной проволоке придается сложное вращательно-поступательное движение. В этом случае сопротивление прохождению проволоки резко падает, что обеспечивает стабильное перемещение проволоки при низких значениях тяговых усилий механизма подачи.

В соответствии с требованиями ГОСТ 18130—79 тяговые усилия подающих механизмов полуавтоматов дуговой сварки с толкающей системой подачи электродной проволоки должны составлять: 100 Н — для стальных проволок диаметром до 1,4 мм и алюминиевых проволок всех диаметров, 200 Н — для стальных проволок диаметром 1,6—3,0 мм. При выборе мощности на валу двигателя нужно учитывать следующие составляющие:

$$P_{дв} = P_{п.р} + P_{п.т} + P_{п.с} + P_{п.п}, \quad (2.1)$$

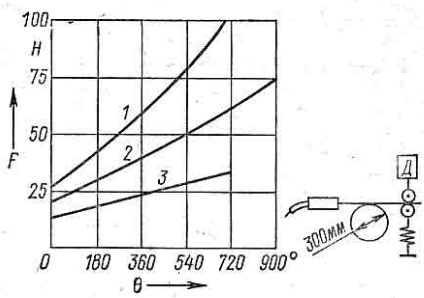


Рис. 2.2. Зависимость усилия подачи электродной проволоки диаметром 1,2 мм от угла скручивания шланга для систем толкающего (*1*), тянущего (*2*) и тянуще-толкающего (*3*) типов

где $P_{п.р}$ — потери мощности в редукторе; $P_{п.т}$ — то же на трение в подающих роликах; $P_{п.с}$ — потери мощности на сматывание проволоки с бухты; $P_{п.п}$ — то же на проталкивание проволоки по шлангу.

Значения $P_{п.т}$ и $P_{п.с}$ (при бухте с проволокой массой 25 кг) по экспериментальным данным составляют по 5 Вт. Максимальная мощность, расходуемая на проталкивание проволоки со скоростью 960 м/ч,

$$P_{п.п} = Fv = 200 \cdot 0{,}27 = 54 \text{ Вт}, \quad (2.2)$$

где F — тяговое усилие, Н; v — скорость подачи, м/с.

Измеренный КПД редуктора полуавтоматов новой серии на номинальной частоте вращения двигателя серии КПА составил 0,72. Следовательно, мощность на валу двигателя

$$P_{дв} = \frac{P_{п.т} + P_{п.с} + P_{п.п}}{\eta_р} = \frac{5 + 5 + 54}{0{,}72} = 90 \text{ Вт}, \quad (2.3)$$

откуда потери мощности в редукторе

$$P_{п.р} = P_{дв} - P_{п.т} - P_{п.с} - P_{п.п} = 90 - 64 = 26 \text{ Вт}. \quad (2.4)$$

Вторым важнейшим требованием к системе подачи является стабильность скорости подачи электродной проволоки. В современных полуавтоматах, как правило, применяются системы автоматического регулирования частоты вращения двигателя, обеспечивающие изменение скорости подачи проволоки не более 10 % при изменении напряжения питающей сети в пределах от +5 до —10 % номинального значения и одновременном изменении нагрузки двигателя от 0,2 $I_{ном}$ до $I_{ном}$. При этом обеспечивается кратность плавного регулирования скорости подачи проволоки не менее 8 (с учетом разброса номинальной частоты вращения конкретных экземпляров двигателей).

Причинами колебаний скорости подачи электродной проволоки в системах подачи толкающего типа являются многие факторы, в том числе и зависящие от принципа подачи и конструктивных особенностей системы. Из-за наличия сопротивления трения между проволокой

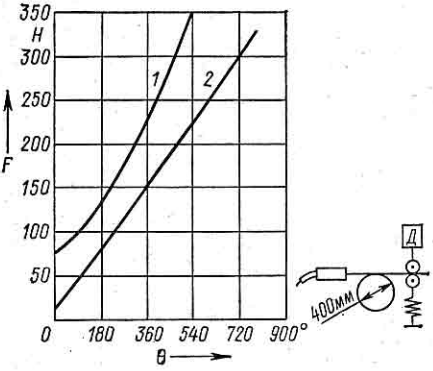


Рис. 2.3. Зависимость усилия подачи электродной стальной (*1*) и титановой (*2*) проволоки от угла изгиба направляющего канала

и стенками направляющего канала проволока изгибается, и чем больше сопротивление трения, тем чаще становятся циклы изгиба. При увеличении нагрузки в осевом направлении сопротивление трения растет по экспоненциальной зависимости:

$$T_1 = T_2 e^{\mu\theta}, \qquad (2.5)$$

где T_2 — сила сопротивления в прямом направляющем канале; μ — коэффициент трения; θ — угол закручивания направляющего канала. Отсюда следует, что сила сопротивления при скручивании канала резко возрастает и подача проволоки может прекратиться. Изгиб электродной проволоки в большой степени зависит от соотношения между диаметром проволоки и внутренним диаметром направляющего канала.

Оптимальные соотношения, найденные экспериментальным путем и применяемые в горелках отечественных полуавтоматов, приведены ниже:

Диаметр электродной проволоки, мм . . .	0,8—1,0	1,0—1,4	1,4—2,0	2,0—3,0
Внутренний диаметр направляющего канала, мм	1,5	2,5	3,2	4,7

В конечном счете подача электродной проволоки с изгибами внутри направляющего канала приводит к нестабильности сварочного процесса, поскольку по сравнению с подачей без изгибов длина электродной проволоки от подающих роликов до дуги увеличивается, причем все время с колебаниями.

Колебания скорости подачи электродной проволоки могут также вызываться сплавлением (прихватыванием) проволоки в токоподводящем наконечнике в результате уменьшения точек соприкосновения, следовательно, увеличения плотности тока в точках контакта. Явление сплавления резко увеличивает сопротивление прохождению проволоки, и если кабель направляющего канала подвержен значительным удлинениям при растяжении, т. е. имеет недостаточную продольную жесткость, то при срыве точек сплавления происходит увеличение скорости подачи, приводящее к нарушению режима.

Для уменьшения влияния этих факторов применяют удлиненный наконечник, с длиной контактирующей части около 40 мм и соотно-

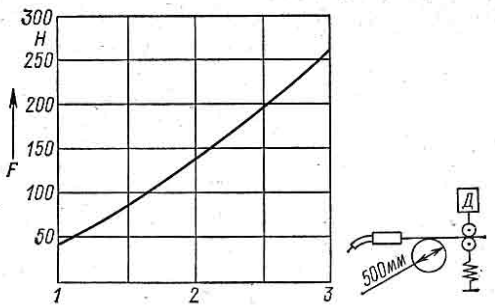


Рис. 2.4. Зависимость усилия подачи электродной проволоки от степени загрязненности канала

шением диаметров электродной проволоки и внутренних диаметров наконечника, указанным ниже:

Диаметр электродной проволоки, мм . . .	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	2,0	2,5	3,0
Внутренний диаметр наконечника, мм . . .	0,9	1,2	1,4	1,6	1,8	2,3	2,8	3,3

Конструкция кабеля направляющего канала не должна допускать удлинений более 2 мм при усилии растяжения оболочки до 1000 Н.

В процессе эксплуатации необходимо иметь в виду, что сопротивление прохождению проволоки зависит от положения шланга. На рис. 2.3 приведена зависимость усилий подачи электродной стальной и титановой проволок от угла изгиба (скручивания) направляющего канала при петле диаметром 400 мм. И, наконец, при эксплуатации следует иметь в виду, что с загрязнением направляющего канала быстро растут усилия сопротивления подаче. В конечном счете загрязнение может привести к прекращению подачи. На рис. 2.4 дана зависимость усилия подачи электродной проволоки диаметром 2 мм при скорости 600 м/ч от степени загрязненности канала, где цифры на оси абсцисс означают: 1 — чистый канал, 2 — средняя степень загрязненности, 3 — сильно загрязненный канал. Шланг имеет одну петлю диаметром 500 мм.

Токоподводящие устройства. В полуавтоматах и автоматах дуговой сварки плавящимся электродом получили распространение три основных типа токоподводящих устройств (рис. 2.5): *а* — токоподвод с цельным трубчатым наконечником; *б* — токоподвод с разрезными вкладышами и цанговым креплением; *в* — сборный токоподвод с разрезными вкладышами. Существуют и другие конструкции токоподводов: роликовые, сапожковые и т. д., но они применяются значительно реже.

Процесс токосъема неразрывно связан с износом контактирующих поверхностей. Работа и износ контактных частей зависят от внешних условий и свойств используемых материалов. Процесс износа можно рассматривать как механический и электромеханический.

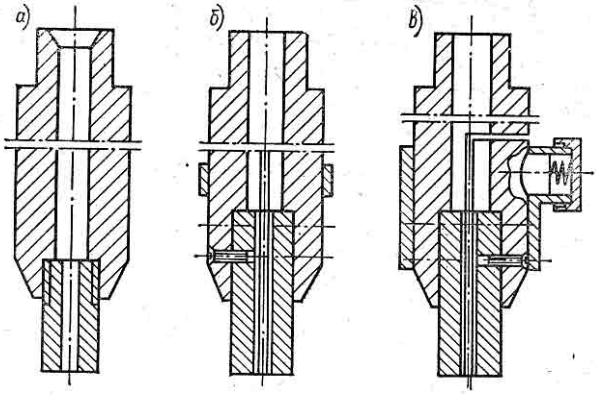


Рис. 2.5. Типы токоподводящих устройств

Механический износ вызывается контактным давлением, выражается в механическом переносе частиц материала токоподвода на электродную проволоку. На механический износ решающее влияние оказывают твердость материалов, контактное давление и прочность материала на сдвиг. При увеличении контактного давления до некоторого критического значения $q_{кр}$ износ практически мало меняется, далее же пластическое передеформирование контактирующей поверхности заменяется резанием, в результате чего на поверхности появляются задиры — износ резко возрастает. Для большинства материалов, применяемых в токоподводящих устройствах (медь М1, М2, М3 или МЦ, бронза марок БрАЖ9-4, БрХ-08, БрБ-2), удельное критическое давление лежит в пределах 0,8—1,0 МПа.

Электромеханический износ вызывается мостиковой, дуговой и искровой эрозией, дуговой коррозией и горячим свариванием. Он тем выше, чем выше плотность тока и меньше стабильность контакта. Рассматривая процесс токосъема в сварочных устройствах, нужно иметь в виду его специфические особенности:

наличие силы трения дополнительно к контактному давлению, воздействующей на контактные слои и на токопередающий механизм;

непрерывные упругопластические деформации контактных поверхностей и пульсации контактного давления вследствие действия различных факторов;

возможность несовпадения мест механического и электрического контакта на скользящей поверхности из-за неравномерного распределения нагрузки;

неустойчивое тепловое состояние в контактных точках в результате их перемещения по контактным поверхностям;

разрушение и удаление продуктов износа трением вследствие перемещения контактных поверхностей;

большую чувствительность скользящего токосъема к внешним виброударным воздействиям;

уменьшенную вероятность слипания и сваривания контактирующих поверхностей, но повышенную склонность к электромеханическому разрушению.

Рациональность использования того или иного типа токоподводящих устройств нужно определять в каждом конкретном случае с учетом перечисленных выше факторов. Токоподвод с цельным наконечником (рис. 2.5, *а*) наиболее прост в изготовлении и компактен. Эта конструкция широко используется в полуавтоматах дуговой сварки, но в автоматах дуговой сварки ее применение ограничено рядом причин. Во-первых, в ней отсутствует возможность обеспечения оптимального давления по всей зоне контакта; во-вторых, контакт происходит в перемещающихся точках и существенно зависит от исходного состояния электродной проволоки, т. е. ее кривизны, чистоты поверхности и пр. Это приводит к тому, что в тяжелонагруженных режимах, когда сварочные токи имеют значение 1000 А и выше, резко возрастает электромеханический износ и использование контактного наконечника из обычных материалов, меди или бронзы, неэффективно. Кроме того, при использовании проволоки большого диаметра (более 3 мм) увеличивается механический износ.

Цанговый токоподвод (рис. 2.5, *б*) обеспечивает упругое поджатие контактных вкладышей к проволоке. Такое конструктивное решение имеет значительные преимущества, однако в эксплуатации требует довольно большого навыка сварщика-оператора, поскольку:

цанговое закрепление вкладышей может обеспечить их надежное прилегание к электродной проволоке только при значительном усилии в зоне контакта. Это усилие, не ограничиваемое по значению, может превысить допустимое по условиям механического износа и привести к выходу из строя токоподвода;

несущая часть при таком закреплении вкладышей имеет невысокую частоту собственных колебаний, что повышает чувствительность токоподвода к внешним виброударным нагрузкам и снижает надежность его работы;

цанговое закрепление вкладышей не обеспечивает равномерного давления по всей длине зоны контакта. Распределение нагрузки по длине имеет сложную параболическую форму с выраженным и неопределенным максимумом. Жесткость несущей части велика, а колебания диаметра электродной проволоки по длине вкладыша достигают 10 %. В таких условиях сложно устанавливать и поддерживать постоянными сварочные параметры.

Третья конструкция, сборный токоподвод с разрезными контактными вкладышами (рис. 2.5, *в*), исключает недостатки первых двух. Токоподвод такого типа сложнее, но дает возможность объективно устанавливать и поддерживать в заданных пределах оптимальные условия токосъема. Для этого достаточно правильно выбрать значение контактного давления и предусмотреть конструктивные меры по его заданию и ограничению, что в данном случае не представляет особой сложности.

Контактное давление $P_к$ является весьма важным параметром токоподвода. При его выборе нужно иметь в виду, что как чрезмерное его увеличение, так и уменьшение резко снижают надежность работы токоподвода. При увеличении контактного давления уменьшается сопротивление переходной зоны и улучшается прилегание проволоки к вкладышу, но увеличивается механический износ; при уменьшении контактного давления уменьшается механический износ, но увеличивается сопротивление переходной зоны, ухудшается прилегание проволоки к вкладышу — возрастает электромеханический износ. Контактное давление должно быть выбрано оптимальным и поддерживаться на заданном уровне с определенной точностью.

Так как стабильность контактного давления зависит в основном от удельной жесткости, то последняя должна быть невысокой — порядка 10 % от уровня номинальной нагрузки. Наиболее компактными по конструкции и удобными в работе являются упругие элементы с нелинейной характеристикой жесткости.

Верхний предел контактного давления, определяемый по допустимому критическому давлению, для большинства материалов контактных вкладышей и стандартной электродной проволоки не должен превышать

$$q_{кр} \leqslant 0{,}8 \ldots 1{,}0 \text{ МПа}. \qquad (2.6)$$

Нижний предел определяется допустимым сопротивлением переходной зоны $R_п$ и может быть рассчитан для принятого материала контактного вкладыша по формуле

$$P_{кр} = \rho \sqrt{H_B c}/(0{,}2R_п), \qquad (2.7)$$

где c — коэффициент, зависящий от качества обработки и состояния контактных поверхностей и находящийся в пределах 1,5—3,0; H_B — твердость материала контактного вкладыша по Бринеллю; $R_п$ — допустимое сопротивление переходной зоны, Ом; ρ — удельное сопротивление материала контактирующих поверхностей, большее по абсолютному значению удельного сопротивления материала проволоки или токоподвода, Ом·см.

Основной путь решения проблемы улучшения токосъема — это совершенствование конструкции токоподводов, подбор оптимальных статических характеристик. Совершенствование токоподводов идет, как правило, в направлении создания более сложных конструкций.

Механизм подачи электродной проволоки. Подача электродной проволоки в автоматах и полуавтоматах дуговой сварки осуществляется ее протягиванием (проталкиванием) между вращающимися роликами, прижатыми к проволоке. Различают механизмы со ступенчатым и плавным регулированием скорости подачи. В первом случае редуктор имеет набор сменных шестерен, в качестве двигателя используется асинхронный электродвигатель. Во втором случае используется электродвигатель постоянного тока с регулируемым числом оборотов.

Скорость подачи может быть рассчитана по формуле

$$v_э = \frac{d_р}{5{,}3} \frac{n_{дв}}{i}, \qquad (2.8)$$

где $d_р$ — расчетный диаметр подающего ролика, мм; $n_{дв}$ — число оборотов двигателя, об/мин; i — передаточное число редуктора; 5,3— коэффициент.

Наиболее ответственной частью механизма подачи является роликовое устройство. Для подачи используют механизмы, состоящие из одной или двух пар подающих роликов, прижатых к проволоке. Тип механизма определяется видом подаваемой проволоки. Основными параметрами роликового механизма являются усилие прижатия роликов к проволоке, жесткость упругого элемента, диаметр роликов, форма поверхностей, контактирующих с проволокой.

Принято, что максимум результирующего касательного усилия протягивания проволоки пропорционален усилию прижатия подающих роликов к электродной проволоке:

$$F \sim \psi N, \qquad (2.9)$$

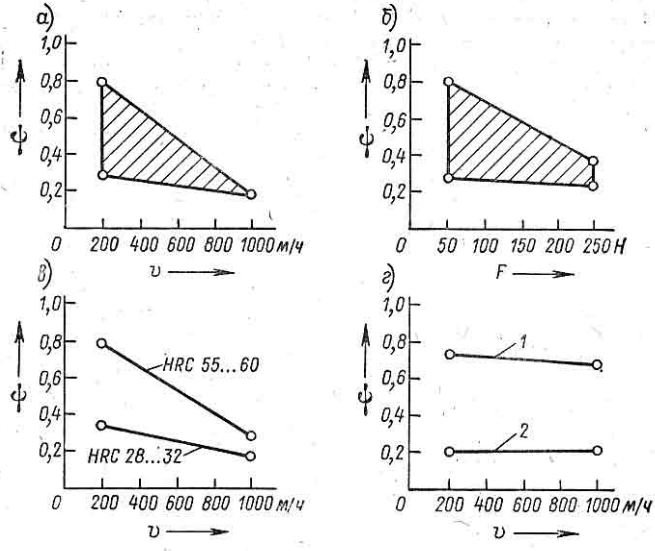


Рис. 2.6. Зависимость коэффициента сцепления: *а* — от скорости подачи; *б* — от усилия сопротивления подаче; *в* — от материала ролика; *г* — от состояния поверхности проволоки (*1* — проволока с нормальной поверхностью; *2* — проволока с дефектной поверхностью)

где F — тяговое усилие, Н; ψ — коэффициент сцепления роликов с проволокой; N — усилие прижатия роликов к проволоке, Н.

Условие нормальной работы подающего механизма можно записать в виде

$$T_s > W, \qquad (2.10)$$

где T_s — текущее значение подающего усилия, Н; W — усилие сопротивления подаче, H.

Зная (задавая) усилие сопротивления подаче и коэффициент сцепления, можно получить необходимое усилие поджатия роликов к проволоке. Усилие сопротивления подаче — величина, зависящая от многих факторов и изменяющаяся в процессе работы в широких пределах. На основании имеющихся опытных данных ее максимальное значение для автоматов и полуавтоматов дуговой сварки принимают в пределах 200—300 Н.

Коэффициент сцепления подающих роликов с электродной проволокой в общем случае — величина, нетождественная коэффициенту трения скольжения. Установлено, что для данного материала и состояния контактных поверхностей при небольшом диапазоне изменения усилия поджатия роликов его значение существенно зависит от скорости подачи (рис. 2.6, *а*) и усилия сопротивления подаче (рис. 2.6, *б*). Закономерности влияния на коэффициент сцепления материала ролика и состояния контактной поверхности проволоки показаны соответственно на рис. 2.6, *в*, и *г*. Анализируя представленные зависимости, можно сделать выводы.

Коэффициент сцепления подающего ролика с электродной проволокой зависит от скорости подачи. Для нормальных условий с увеличением скорости подачи сцепление ролика с проволокой ухудшается, коэффициент сцепления стремится к своему предельному значению (для гладких подающих роликов $\psi_{пр} = 0{,}2$).

Для проволоки, имеющей несистематические дефекты на поверхности, реализуемый коэффициент сцепления снижается: $\psi_{пр} = 0{,}1$.

Коэффициент сцепления может быть повышен за счет конструкции роликов. Они могут быть выполнены цилиндрическими с насечкой, с канавкой и насечкой, шестеренчатыми с канавкой в зубьях шестерен, обрезиненными и т. д. Подающее усилие может быть повышено также применением нескольких ведущих роликов (пары или более). Обычно подающие ролики изготовляются из термообработанной до HRC 56 ... 60 стали ХВГ, ХГ, 40Х или ШХ15.

Сила подачи проволоки характеризуется зависимостью вида

$$M = FD/2 = f(v), \tag{2.11}$$

где M — крутящий момент на ролике, Н·м; F — усилие на ролике, Н; D — диаметр ролика, м; v — скорость подачи, м/с.

Характеристикой или параметром данной зависимости является ее жесткость, равная

$$X_F = -\frac{1}{F_0}\frac{dF}{dv}, \tag{2.12}$$

где F_0 — усилие подачи в начале процесса. Этот параметр определяет уменьшение подающего усилия с ростом скорости подачи.

По аналогии формально вводят в рассмотрение параметр, определяющий уменьшение коэффициента сцепления при увеличении скорости подачи, — удельную жесткость характеристки сцепления S_t, равную

$$S_t = -\frac{1}{\psi_0}\frac{d\psi}{dv}, \tag{2.13}$$

где ψ_0 — реализуемый коэффициент сцепления в начальный момент.

Обе характеристики имеют размерность, обратную размерности скорости подачи. Они могут быть получены экспериментальным путем. Причем X_F можно рассчитать для данного типа двигателя. Сравнение обеих характеристик позволяет судить о том, в какой степени правомерно принимать расчетное значение N в качестве оптимального. Если динамическая жесткость характеристики усилия подачи X_F близка к удельной жесткости характеристики сцепления S_t, то переменная составляющая N близка к постоянной составляющей. В противном случае нужно увеличить нагрузку.

Важным параметром подающего механизма является жесткость прижимной пружины. Она существенно влияет на процесс сцепления ролика с проволокой. Установлено, что роликовый механизм без упругого элемента неработоспособен. Увеличение удельной жесткости упругого элемента приводит к значительным колебаниям усилия и скорости подачи в тяжелонагруженных режимах. Для улучшения условий подачи следует использовать упругие элементы с невысокой удельной жесткостью на заданном уровне нагрузки. Желательно предусмотреть в конструкции элементы, ограничивающие значение прикладываемой нагрузки на уровне, соответствующем реализуемому

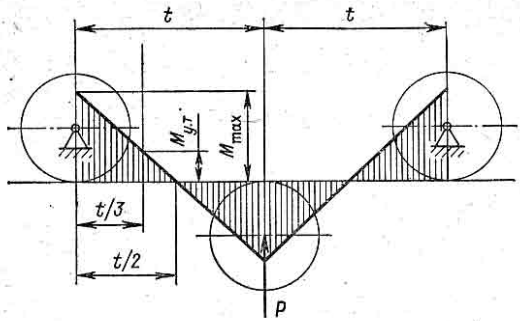


Рис. 2.7. Эпюра изгибающих моментов, действующих на проволоку

коэффициенту сцепления. Выбор оптимальных значений усилия прижатия ролика, жесткости упругого элемента позволяет:

повысить надежность подачи проволоки без проскальзывания и расширить область применения гладких роликов;

снизить нагрузку на элементы конструкции и повысить долговечность механизма;

повысить КПД и улучшить стабильность подачи.

Правка электродной проволоки. Правка электродной проволоки в сварочных автоматах и полуавтоматах осуществляется плоским пластическим изгибом между правильными роликами. Оптимизация процесса правки прежде всего связана с выбором рациональных параметров правильного механизма. Основными параметрами плоского роликового механизма являются число, шаг и диаметр роликов, а также мощность, затрачиваемая на правку.

На основании анализа существующих механизмов, а также рассмотрения сил и моментов, действующих на выпрямляемую проволоку, можно сформулировать основные требования, которым должны отвечать правильные механизмы.

Как следует из диаграммы распределения напряжений и деформаций для случая упругопластического изгиба, процесс правки происходит успешно для большинства сварочных проволок (предел текучести материала $\sigma_т = 250 \ldots 1000$ МПа) при условии проникновения пластической деформации на глубину 94—97 % высоты сечения изгибаемой проволоки.

Анализируя эпюру изгибающих моментов, действующих на проволоку (рис. 2.7), можно установить, что пластическая деформация распространяется по длине максимально на одну треть шага роликов, а на остальном участке имеет место чисто упругая деформация, т. е. уменьшение шага роликов повышает эффективность правки. Уменьшение шага ограничивается условием прочности правильных роликов, условием размещения подшипников опор нужной грузоподъемности, условием прочности проволоки.

Если принять в качестве определяющего третье условие, то можно получить для шага роликов выражение

$$t/4 \geqslant 4{,}22\sqrt{E/\sigma_т}, \qquad (2.14)$$

где t — шаг роликов, мм; E — нормальный модуль упругости, ГПа; $\sigma_т$ — предел текучести материала проволоки, ГПа.

Для обеспечения перекрытия зоны правки диаметр правильных роликов должен соответствовать принятому шагу, причем

$$D \leqslant (0{,}7 \ldots 0{,}8)\ (t - 2d), \tag{2.15}$$

где d — диаметр проволоки, мм; D — диаметр ролика, мм.

Существует приближенная зависимость для проволок с $\sigma_т = 250 \ldots 1000$ МПа симметричного сечения по условию прочности: $D > (5 \ldots 10)\ d$. Верхний предел диаметра правильного ролика ограничен глубиной проникновения деформации:

$$D_{max} \leqslant 2kEd/\sigma_т, \tag{2.16}$$

где k — коэффициент упругой зоны, равный

$$k = \frac{2\sigma_т r\rho}{Ed\,(r + \rho)}, \tag{2.17}$$

где ρ — радиус начального изгиба, мм; r — радиус обратного изгиба, мм.

Число правильных роликов должно определяться минимальным числом изгибов, необходимых для устранения кривизны наименьшего радиуса. Увеличенное на два, это число дает необходимое число роликов. Зависимость остаточной кривизны от действующего момента определяется выражением

$$\rho_{ост} = \frac{d - \overline{M} r\varepsilon_т}{rd}, \tag{2.18}$$

где $\overline{M}$ — относительный момент, который выражается отношением момента пластического изгиба M к моменту упругого изгиба $M_{у.\,т}$; $\varepsilon_т$ — относительная деформация.

Таким образом, задаваясь остаточной кривизной $\rho_{ост}$ и диаметром проволоки d, можно определить максимальную исходную кривизну, которая может быть устранена однократным перегибом. Причем большое число роликов и меньший шаг требуются:

для тонких проволок со значительной исходной кривизной;

для проволок, поперечное сечение которых характеризуется большим значением отношения площади сечения к его моменту сопротивления изгибу.

При числе правильных роликов больше трех на каждом последующем ролике нагрузка увеличивается и в пределе равна $8M/t$.

Мощность, затрачиваемая на правку, включает в себя мощность на преодоление трения в опорах роликов и на пластическую деформацию проволоки.

Мощность пластической деформации может быть определена по формуле

$$N = M_{кр} v/(D\eta), \tag{2.19}$$

где $M_{кр}$ — крутящий момент на ролике, Н·см; v — скорость подачи, см/с; η — КПД механизма. Здесь крутящий момент

$$M_{кр} = M^2 D/(4EJ), \tag{2.20}$$

где $M = d^3\sigma_т/4$ — максимальный изгибающий момент; J — момент инерции поперечного сечения проволоки при изгибе.

Часть мощности, затрачиваемая на преодоление трения в опорах, определяется по известным формулам в зависимости от типа опор.

При повышенных требованиях к качеству правки проволоки конструкция устройств на базе плоских роликовых механизмов совершенствуется в двух эффективных направлениях:

путем увеличения числа правильных роликов, т. е. правки неоднократным изгибом. Причем для улучшения правки используют изменяющееся от изгиба к изгибу перекрытие роликов. Остаточная кривизна при такой правке может быть сведена к минимуму. Однако этот способ эффективен при условии оптимальной, точной настройки, т. е. зависит от исходного состояния проволоки и опыта наладчика;

путем правки проволоки с предварительным сильным изгибом (за пределами текучести). Правка дает хороший результат при сильно искривленной проволоке, но требует значительных затрат мощности.

Использование механизмов правки другого типа (перегиб в различных плоскостях и пр.) в автоматах и полуавтоматах дуговой сварки ограниченно.

2.3. КОНСТРУКЦИЯ И ТИПЫ ПОЛУАВТОМАТОВ

Полуавтоматы ПДГ-305, ПДГ-307, ПДГ-308 и ПДГ-502 имеют унифицированные подающие устройства и блок управления. Регулирование скорости подачи электродной проволоки осуществляется с дистанционного пульта управления, который может размещаться вблизи сварщика. Команды на начало и окончание сварки подаются с помощью выключателя, установленного на рукоятке горелки. Блок управления БУ-06 обеспечивает постоянство скорости подачи проволоки и необходимый цикл работы. Блок размещен в нише источника сварочного тока. Все полуавтоматы предназначены для сварки в среде углекислого газа.

Полуавтомат ПДГ-305 комплектуется выпрямителем ВДГ-302, двумя горелками типов ГДПГ-101-10 и ГДПГ-301-8, редуктором-расходомером У-30, соединительными проводами, щитком сварщика и запчастями.

На подающем устройстве (рис. 2.8) размещаются редукторный привод подачи электродной проволоки *1*, тормозное устройство *2* с кассетой *3*, двухпанельный блок разъемов *4*. К лицевой панели блока подключаются коммуникации горелки. Задняя панель, расположенная в средней части основания подающего устройства, выполнена откидной для удобства подключения проводов и шлангов, соединяющих подающее устройство с источником сварочного тока. Редукторный привод подачи и кассета закрыты составным кожухом. Снаружи кожуха устанавливается съемный пульт дистанционного управления.

Унифицированный редукторный привод состоит из трехступенчатого цилиндрического редуктора с передаточным

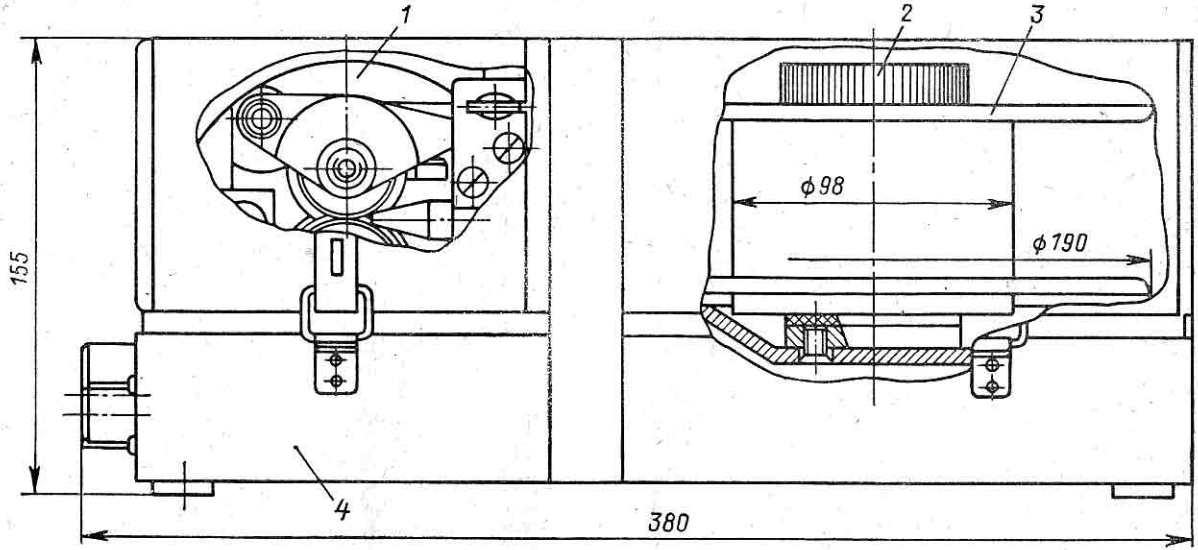


Рис. 2.8. Подающее устройство полуавтомата ПДГ-305

числом 27 и двигателя постоянного тока с независимым возбуждением типа КПА-531, мощностью 90 Вт. На корпусе редуктора соосно с выходным валом расположен цилиндрический выступ для установки прижимного устройства.

Прижимное устройство состоит из роликов, поджимаемых один к другому в радиальном направлении. Ведущий ролик установлен на выходном валу редуктора, а прижимной — на поворотном рычаге корпуса, закрепленного на выступе редуктора. Усилие поджатия прижимного ролика регулируется винтом, воздействующим на рычаг через плоскую пружину. Жестко связанные с роликами шестерни исключают их взаимное проскальзывание.

Горелка ГДПГ-301-8 (рис. 2.9) предназначена для сварки электродной проволокой диаметром 1,2 и 1,4 мм током до 315 А. Горелка состоит из корпуса *8*, спирали *5*, свечи, *3*, наконечника *4*, цанги *2*, сопла *1*, токоподвода *10*, направляющего канала для электродной проволоки *11*, выключателя *7*, проводов управления *9*. Корпус горелки заключен в пластмассовую рукоятку *6*.

Горелка ГПДГ-101-10 конструктивно подобна горелке ГПДГ-301-8, но имеет меньшие габариты и рассчитана на сварку проволокой диаметром 0,8 и 1 мм. Длина коммуникаций горелки 2 м. Разъемы для подключения горелок у подающего механизма унифицированы.

На переносном пульте дистанционного управления смонтированы: тумблер для проверки поступления защитного газа и подачи электродной проволоки, тумблер для реверсирования вращения двигателя механизма подачи, потенциометр для регулирования скорости подачи электродной проволоки и потенциометр для регулирования напряжения дуги.

Полуавтомат ПДГ-307 предназначен для сварки как протяженным, так и прерывистым швами и электродуговыми точками. Комплектность полуавтомата соответствует комплектности полуавтомата ПДГ-305, дополнительно поставляются упоры для горелок ГДПГ-101-10 и ГДПГ-301-8, используемые при сварке электродуговыми точками.

От полуавтомата ПДГ-305 полуавтомат ПДГ-307 отличается прижимным устройством и некоторыми изменениями в блоке управления БУ-06. Прижимное устройство (рис. 2.10) закрепляется на цилиндрическом выступе редуктора и представляет собой корпус *1*, несущий ше-

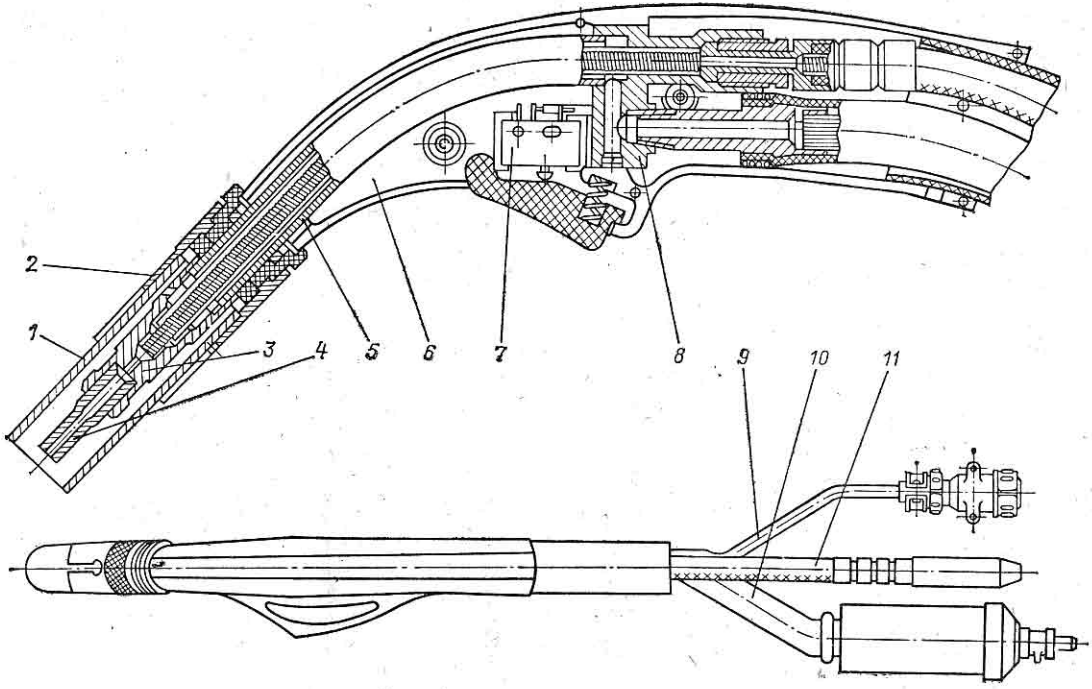


Рис. 2.9. Горелка ГДПГ-301-8

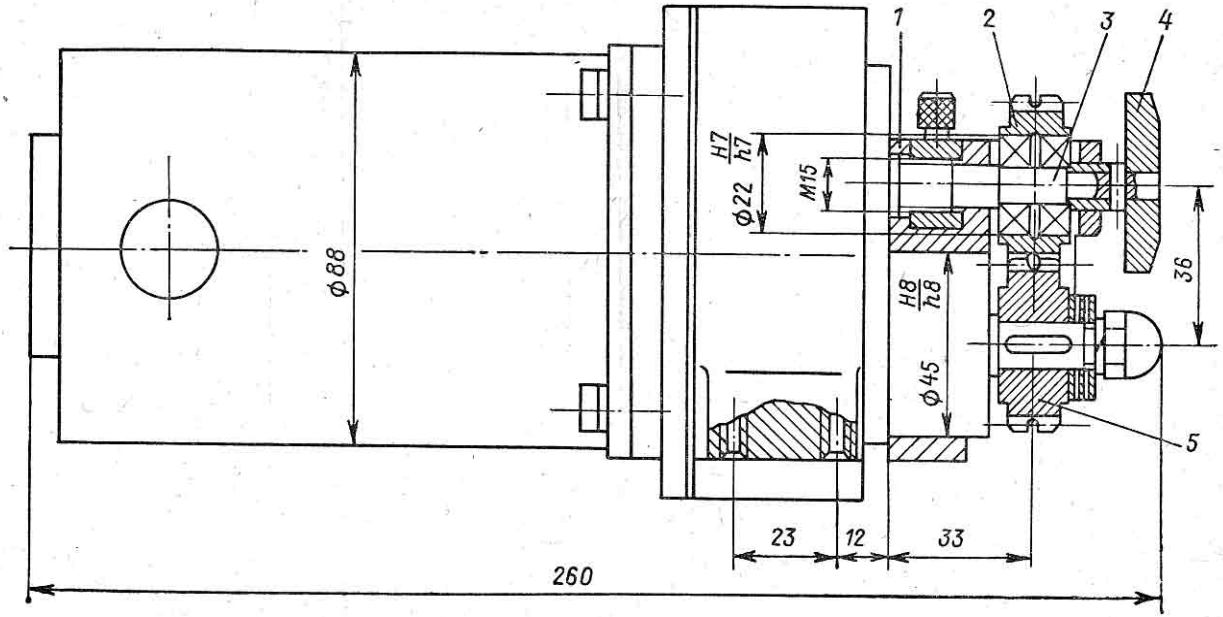
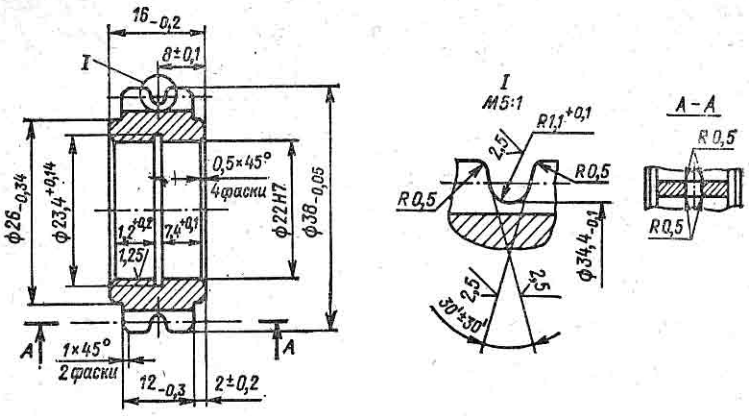


Рис. 2.10. Прижимное устройство полуавтомата ПДГ-307



Rz20 (▽)

Модуль	m	1,0
Число зубьев	z	36
Исходный контур	—	ГОСТ 13755—81
Коэффициент смещения исходного контура	ξ	0
Степень точности по ГОСТ 1643—81	—	Ст8-х
Диаметр делительной окружности	$d_д$	36
Толщина зуба по дуге делительной окружности	$s_д$	1,57
Длина общей нормали	w	$10{,}837^{-0{,}034}_{-0{,}072}$

1. HRC 45 ... 50
2. Покрытие Хим. окс. прм.

Материал: круг $\frac{\text{В45 ГОСТ 2590—71}}{\text{40Х ГОСТ 4543—71}}$

Рис. 2.11. Подающая шестерня прижимного устройства полуавтомата ПДГ-307

стерню *2* с канавкой. Шестерня может смещаться вдоль своей оси при вращении винта *3* маховичком *4*. На выходном валу редуктора закрепляется ведущая шестерня *5* с канавкой. Сварочная проволока заправляется в устройство, когда канавки верхней и нижней шестерен совмещены. Поворотом маховичка верхняя шестерня сдвигается и упруго защемляет проволоку между зубьями шестерен. При вращении шестерен от привода проволока подается по направляющему каналу горелки в зону сварки. Одной парой шестерен можно подавать проволоки различных диаметров. На рис. 2.11 и 2.12 изображены подающие шестерни прижимного устройства полуавтомата ПДГ-307.

Полуавтомат повышенного радиуса действия ПДГ-308 (рис. 2.13) состоит из закрепленной на крыше сварочного выпрямителя ВДГ-302 опоры, несущей шарнирно установленную сбалансированную стрелу со сварочной горелкой ГДПГ-303, имеющей длину шланга 5,5 м. Стрела может качаться в вертикальной плоскости на угол 60° и поворачиваться вокруг вертикальной оси на 270°. Сварочная горелка снабжена устройством для удаления из зоны сварки вредных аэрозолей с выбросом их в цеховую вентиляционную магистраль. Подающее устройство крепится на стреле так, что ось кассеты с электродной проволокой совпадает с осью качания стрелы, поэтому при расходе проволоки не нарушается балансировка стрелы.

В полуавтомате предусмотрено плавно-ступенчатое регулирование скорости подачи электродной проволоки. Устройство подачи подобно устройству подачи полуавтомата ПДГ-307, но имеет две ступени регулирования скорости в отношении 1 : 2 за счет смены ведущей шестерни. Корпус устройства подачи крепится на цилиндрическом выступе редуктора через эксцентриковую втулку. При смене ведущей шестерни и повороте втулки на 180° обеспечивается закрепление верхней шестерни с нижней.

Сварочная горелка ГДПГ-303 предназначена для сварки электродной проволокой диаметром 1,2; 1,4; 1,6 мм током до 315 А. Она является первым представителем новой унифицированной серии горелок, основанной на использовании полого электросварочного кабеля КПЭС со сменной направляющей спиралью. Горелка снабжена дымоотсосом, на мундштуке закрепляется стакан с втулкой, являющийся заборной камерой дымоотсоса. Объем камеры (степень разрежения) регулируется сдвигом втулки по стакану с последующей фиксацией втулки винтом.

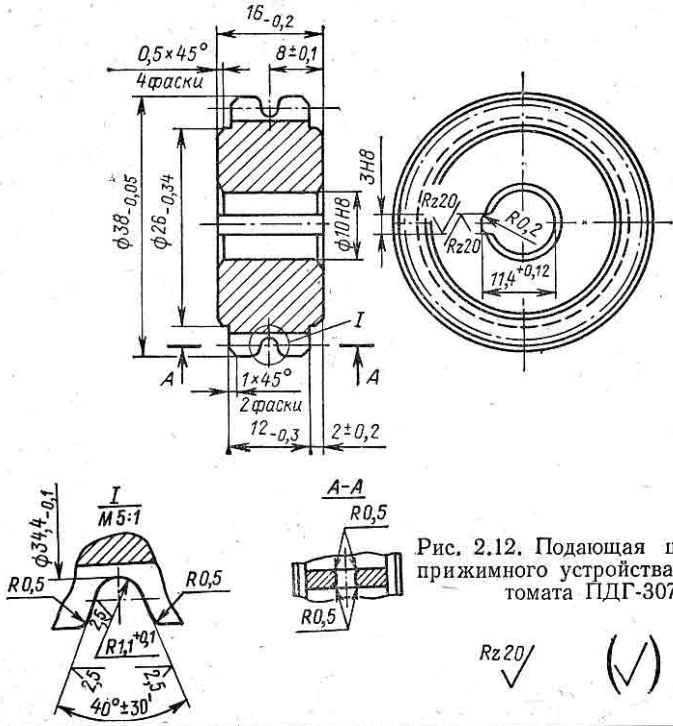


Рис. 2.12. Подающая шестерня прижимного устройства полуавтомата ПДГ-307

Модуль	m	1,0
Число зубьев	z	36
Исходный контур	—	ГОСТ 13755—81
Коэффициент смещения исходного контура	ξ	0
Степень точности по ГОСТ 1643—81	—	Ст8-х
Диаметр делительной окружности	$d_д$	36
Толщина зуба по дуге делительной окружности	$s_д$	1,5
Длина общей нормали	w	$10{,}837^{-0{,}034}_{-0{,}072}$

1. HRC 45 ... 50
2. Покрытие Хим. окс. прм.

Материал: круг $\frac{\text{В15 ГОСТ 2590—71}}{\text{40Х ГОСТ 4543—71}}$

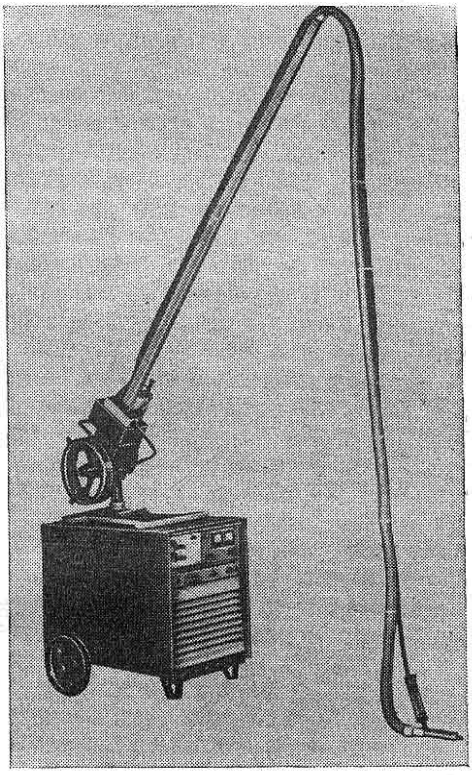


Рис. 2.13. Полуавтомат ПДГ-308

С помощью гибкого шланга камера дымоотсоса соединяется с трубкой стрелы, в которую встроен эжектор, создающий при подаче сжатого воздуха разрежение в отсасывающей магистрали горелки.

Полуавтомат ПДГ-502 комплектуется сварочным выпрямителем ВДУ-504-1, который используется в режиме жестких внешних характеристик; подающим устройством с кассетой на 12 или 20 кг электродной проволоки; горелками ГДПГ-504-1 и ГДПГ-301-8; редуктором-расходомером У-30; соединительными проводами и щитком сварщика.

Отличие подающего устройства полуавтомата ПДГ-502 от подающего устройства полуавтомата ПДГ-305 состоит в том, что к основанию крепятся четыре роликовых колеса,

дающие возможность перемещать устройство в процессе работы. Кожухом закрывается только редукторный привод с прижимным устройством.

Подающие ролики в этом полуавтомате рассчитаны на подачу электродной проволоки четырех диаметров: 1,2; 1,4; 1,6; 2 мм, тогда как в полуавтомате ПДГ-305 — трех диаметров: 1; 1,2; 1,4 мм. На каждый диаметр электродной проволоки дается один ролик с соответствующей клиновидной канавкой. Диаметр роликов у обоих полуавтоматов одинаков и равен 36 мм.

Горелка ГДПГ-501-4 рассчитана на сварку электродной проволокой вышеуказанных диаметров током до 500 А. По конструкции она аналогична горелке ГДПГ-301-8 и отличается от последней сечением токоведущих частей, наличием водоохлаждаемого сопла с трубками подвода и слива воды и экрана, защищающего руку сварщика от тепловых излучений.

Полуавтомат ПДГ-601 предназначен для сварки в двух, заранее выбранных режимах, например для сварки в нижнем и вертикальном положениях без перенастройки режима. Переход с одного режима на другой осуществляется переключением тумблера, установленного на пульте дистанционного управления. При этом устанавливается другая скорость подачи электродной проволоки и другое напряжение источника сварочного тока. Естественно, что полуавтомат может быть использован и для сварки в одном режиме. Полуавтомат комплектуется выпрямителем ВДГ-601 с жесткими внешними характеристиками. При переходе с одного режима на другой (при использовании двухрежимного процесса) ступенчато изменяется и значение индуктивности дросселя в сварочной цепи. Конструкция подающего устройства аналогична конструкции подающего устройства полуавтомата ПДГ-502. Дополнительно в комплект полуавтомата входит четырехроликовое устройство для сварки порошковой проволокой. Горелка на ток 630 А (ГДПГ-603) имеет водяное охлаждение. Для сварки на токах до 315 А полуавтомат комплектуется горелкой ГДПГ-301-8.

Схема полуавтомата построена на базе блока БУ-01.

Полуавтоматы А-1197, предназначенные для сварки (наплавки) проволокой диаметром 1,6—2,0 мм на токах до 500 А, имеют исполнение как с плавным регулированием скорости подачи электродной проволоки (А-1197П), так и со ступенчатым (А-1197С).

Полуавтомат А-1197П предназначен для сварки стальной сплошной проволокой в среде углекислого газа. Полуавтомат А-1197С — для сварки стальной сплошной проволокой как в среде углекислого газа, так и под флюсом, а также стальной порошковой проволокой. Полуавтоматы комплектуются подающим устройством на тележке с фигуркой, сварочной горелкой на один из оговоренных выше способов сварки (для порошковой проволоки — только по специальному заказу), шкафом управления. В качестве источника питания, как правило, используется тиристорный выпрямитель ВДУ-504 или выпрямитель ВС-600.

В подающем механизме полуавтомата А-1197С использован асинхронный трехфазный двигатель типа АОЛ-12-4 мощностью 180 Вт. Скорость подачи меняется за счет смены шестерен в редукторе. Число ступеней — 14. В полуавтомате А-1197П подающий механизм укомплектован электродвигателем КПК-632 мощностью 180 Вт, который управляется тиристорным приводом, позволяющим плавно регулировать скорость подачи электродной проволоки. Полуавтоматы снабжены горелками типа А-1231, редуктором-расходомером У-30, соединительными проводами и шлангами.

Полуавтомат А-1230 предназначен для сварки в среде углекислого газа электродной проволокой сплошного сечения. Отличительной особенностью этого полуавтомата является питание электропривода и схемы управления напряжением дуги. Регулирование скорости подачи — плавно-ступенчатое. Полуавтомат выполнен в виде чемодана, в котором размещены подающее устройство с кассетой для электродной проволоки, элементы схемы управления и газовый клапан. В качестве источника сварочного тока используются выпрямители ВДГ-302, ВСЖ-303, ВС-300. Привод в подающем механизме представляет собой червячный редуктор с двигателем постоянного тока типа СЛ-369М (мощность 50 Вт, напряжение 24 В), электродная проволока подается одной парой роликов (один из пары — ведущий). Изменение скорости подачи проволоки производится двумя способами: ступенчатое — при помощи сменных подающих роликов, плавное—за счет изменения частоты вращения двигателя. Каждому из трех подающих роликов соответствует свой диапазон плавного изменения скорости подачи электродной проволоки.

Полуавтомат снабжается горелкой А-547У для электродных проволок диаметром 0,8; 1,0; 1,2 мм, редуктором-расходомером У-30, соединительными проводами и шлангами.

Полуавтомат ПДГ-508 предназначен для сварки в среде углекислого газа электродной проволокой сплошного сечения диаметром 1,2—2 мм. Регулирование скорости подачи электродной проволоки — ступенчатое. Редуктор подающего механизма выполнен в виде коробки скоростей. Полуавтомат выпускается в двух вариантах:

с промежуточным шкафом управления в комплекте с выпрямителем ВДУ-504 или преобразователем ПГС-500-1;

без шкафа управления, с блоком управления, встроенным в нишу выпрямителя ВДУ-504-1.

В состав полуавтомата входят подающее устройство, сварочная горелка и комплект газовой аппаратуры.

Механизм подачи электродной проволоки приводится во вращение электродвигателем АОЛ-12-4 мощностью 180 Вт. Подача проволоки осуществляется одной парой роликов. Изменение скорости подачи производится поворотом маховичков, расположенных на передней стенке механизма подачи.

Полуавтомат А-547У предназначен для сварки тонколистовых материалов в среде углекислого газа электродной проволокой сплошного сечения диаметром 0,8—1,2 мм. Питание схемы управления электроприводом и схемы цикла осуществляется напряжением дуги. Подающее устройство полуавтомата имеет небольшие габариты и массу, что позволяет использовать его в монтажных условиях. Регулирование скорости подачи электродной проволоки — плавно-ступенчатое. Полуавтомат комплектуется выпрямителем ВС-300. В состав полуавтомата входят также две сварочные горелки, кнопка включения, комплект газовой аппаратуры, провода и шланги.

Подающее устройство (рис. 2.14) оформлено в виде небольшого чемодана, внутри которого расположены электродвигатель с редуктором, кассета и газовый клапан.

Электродвигатель постоянного тока Д-90А-547У имеет мощность 90 Вт, частоту вращения 8200 об/мин. Скорость подачи электродной проволоки изменяется плавно путем изменения частоты вращения электродвигателя и ступенчатой сменой подающих роликов. Из двух сварочных горелок одна рассчитана на сварку проволокой диаметром

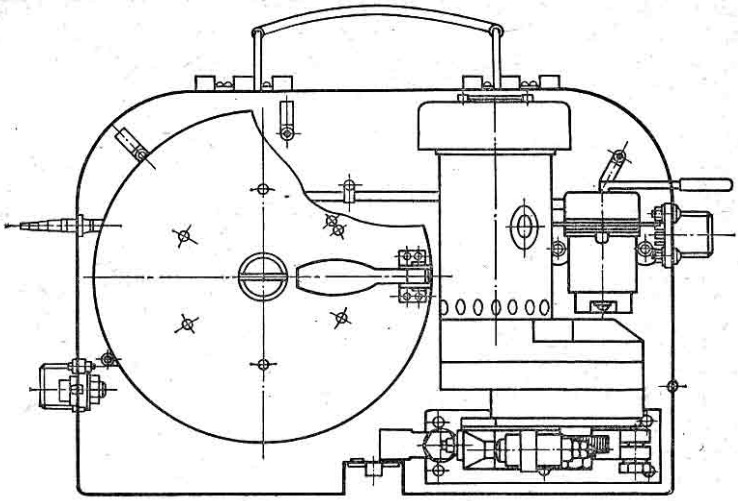


Рис. 2.14. Подающее устройство полуавтомата А-547У

0,8 и 1,0 мм током до 150 А, другая — проволокой диаметром 1,0 и 1,2 мм током до 250 А. В основе конструкции горелок — гибкий шланг, состоящий из двух стальных спиралей, заключенных в медную плетенку и резиновую трубку. По шлангу подается электродная проволока и сварочный ток, а в горелке на 250 А и углекислый газ. Внутренняя спираль извлекается для периодической чистки. В горелке на 150 А кнопки нет. Она устанавливается на ручке щитка сварщика.

Полуавтомат А-825М предназначен для сварки в среде углекислого газа проволокой сплошного сечения диаметром 0,8—1,4 мм. В качестве источника сварочного тока используется выпрямитель ВСЖ-303. В комплект полуавтомата входят подающее устройство, горелка, пульт управления, провода и шланги.

Регулирование скорости подачи электродной проволоки — плавно-ступенчатое. Проволока подается двумя роликами, каждый из которых может быть ведущим. Ролики закрепляются на валах гайками разных конструкций. Одна из гаек соединяется с фрикционом вала, на котором она стоит, и ролик, который она крепит, становится ведущим. При перестановке гаек другой ролик становится ведущим, меняется передаточное число редук-

Таблица 2.1

Параметры	ПДГ-305 ПДГ-307	ПДГ-308	ПДГ-502 ПДГ-503	ПДГ-601	А-1197П	А-1203М	ПДГ-508
Номинальный сварочный ток, А	315		500	630	500	315	500
Продолжительность работы (ПВ), %	60						
Пределы регулирования сварочного тока, А	50—315		100—500	100—700	100—500		
Пределы регулирования рабочего напряжения, В	16—38		18—50	18—66	18—50	16—38	18—50
Диаметр электродной проволоки, мм	0,8—1,4	1,2—1,6	1,2—2,0	1,2—2,5	1,2—2,0 1,6—3,5	0,8—1,4	1,2—2,0
Скорость подачи электродной проволоки, м/ч	120—1200				90—900	140—670	105—738
Масса подающего устройства, кг	12,5	—	13,0	27,6	35,0	12,0	24,0
Тип охлаждения сварочной горелки	Естественное		Естественное Водяное	Водяное			
Расход охлаждающей воды, л/ч	—		100		—	—	—
Расход защитного газа (CO_2), л/ч	1000			1200		1000	1200
Тип источника сварочного тока	ВДГ-302		ВДУ-504-1	ВДГ-601	ВДУ-504	ВДГ-302	ВДУ-504
Первичная мощность, кВ·А	20,0		40,0	69,0	40,0	20,0	40,0
Масса источника сварочного тока, кг	275		400	596	360	275	360
Степень защиты источника сварочного тока	IP22						
КПД источника сварочного тока, %	75			82		75	82

Продолжение табл. 2.1

Параметры	А-547У	А-825М	А-765	ПДГ-312	ПДГ-515	ПДГ-516	ПДГ-603
Номинальный сварочный ток, А	315	300	500	315	500		630
Продолжительность работы (ПВ), %				60			
Пределы регулирования сварочного тока, А	50—315		60—500	50—315	60—500		100—700
Пределы регулирования рабочего напряжения, В	20—40	18—48	16—40	16—38	22—46		18—66
Диаметр электродной проволоки, мм	0,8—1,4	1,0—1,4	1,6—3,5	1,0—1,4	1,2—2,0	1,2—2,0 2,0—3,0	1,2—2,0 (С) 2,0—3,0 (П)
Скорость подачи электродной проволоки, м/ч	160—650	140—650	72—720		120—960		
Масса подающего устройства, кг	6,2	14,0	30,0		12,0		18,0
Тип охлаждения сварочной горелки			Естественное				Естественное Водяное
Расход охлаждающей воды, л/ч	—	—	—	—	—	—	100
Расход защитного газа (CO_2), л/ч	1000		1200	1000	1200		
Тип источника сварочного тока	ВС-300	ВСЖ-303	ПСГ-500-1	ВДГ-303	ВДУ-506	ВДУ-505	ВДГ-601
Первичная мощность, кВ·А	20,0		31,0	20,0	40,0		69,0
Масса источника сварочного тока, кг	210	220	470	230	310	300	595
Степень защиты источника сварочного тока	IP22		—		IP22		
КПД источника сварочного тока, %	70	72	64	73	79		82

тора. Регулированием оборотов двигателя скорость по ступеням меняется в пределах 140—320 м/ч и 320—650 м/ч.

В сварочной горелке электродная проволока диаметром 1,0—1,4 мм подается по направляющему каналу с внутренним диаметром 2,5 мм (длина 2,5 м), проволока диаметром 0,8 мм — по сменному каналу с внутренним диаметром 1,5 мм (длина 1,8 м).

Пульт управления устанавливается на передней стенке выпрямителя ВСЖ-303 и предназначается для управления процессом сварки (регулирование скорости подачи электродной проволоки, контроль режима и др.).

Полуавтомат А-765 предназначен для сварки и наплавки порошковой самозащитной проволокой диаметром 1,6—3,6 мм. В качестве источника сварочного тока используется преобразователь ПСГ-500. Подающее устройство представляет собой тележку, на которой размещаются подающий механизм и кассетное устройство (фигурка) для бухты электродной проволоки массой 25 кг. Регулирование скорости подачи проволоки — ступенчатое, за счет смены шестерен редуктора. Число ступеней — 20. При этом диапазон скоростей составляет 58—582 м/ч. В механизме подачи используется трехфазный асинхронный двигатель АОЛ-12-2 мощностью 0,27 кВт, на напряжение 36 В. Полуавтомат снабжается горелкой для сварки проволокой диаметром 1,6—3,5 мм.

Параметры выпускаемых полуавтоматов приведены в табл. 2.1.

В основу полуавтоматов новой серии ПДГ-312, ПДГ-515, ПДГ-516 и ПДГ-603 положены следующие вновь разработанные унифицированные узлы: электронный блок управления сварочным процессом БУСП-1, сварочные горелки новой серии ГДПГ-201, ГДПГ-304, ГДПГ-502, редукторный привод подачи электродной проволоки и серийно выпускаемые тормозные устройства и кассеты для электродной проволоки.

Использование в полуавтоматах блока БУСП-1 обеспечивает плавное регулирование и стабильность скорости подачи электродной проволоки, позволяет осуществлять сварку не только протяженным, но и прерывистым швами, а также сварку электродуговыми точками.

Конструкция сварочных горелок ГДПГ-201, ГДПГ-304, ГДПГ-502 разработана на основе полого электросварочного кабеля КПЭС (ТУ 16.505.842—78), который содер-

Таблица 2.2

Тип горелки	Номинальный сварочный ток, А	Сечение токоподводящей жилы, мм²	Внутренний диаметр, мм		Диаметр электродной проволоки, мм	Длина кабеля, м
			спирали кабеля	сменной спирали		
ГДПГ-201	200	25	5	2,2	1,2	2,5
ГДПГ-304	315	35	6	2,6	1,2; 1,4	3,0
ГДПГ-502	500	50	6	3,0	1,4; 1,6; 2,0	3,0

жит в резиновой оболочке спираль, оплетенную медными токоподводящими жилами и тремя проводами управления. Медные жилы кабеля могут иметь суммарное сечение 25, 35, 50 и 70 мм², сечение проводов управления — 1,0 мм². Внутрь полого кабеля вставляется сменная спираль с внутренним диаметром, соответствующим диаметру подаваемой через горелку электродной проволоки (табл. 2.2).

Использование кабеля КПЭС и сменной спирали значительно повышает долговечность горелок. Срок службы горелок новой серии — 2,5 года. Для сравнения срок службы горелок ГДПГ-301-8 с направляющим каналом КН-2,5 и токоподводом, выполненным проводом ПЩ в резиновой медицинской трубке, — 6 месяцев.

Охлаждение горелок новой серии — естественное. Конструкция горелок ГДПГ-201, ГДПГ-304, ГДПГ-502 идентична. На рис. 2.15 представлена горелка ГДПГ-304.

Редукторный привод (рис. 2.16) представляет собой цилиндрический трехступенчатый редуктор в силумино-

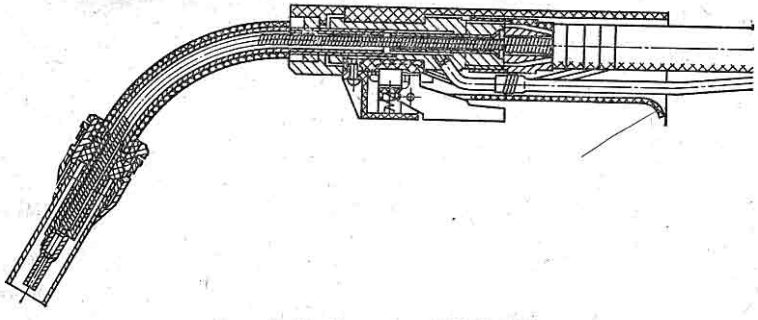


Рис. 2.15. Горелка ГДПГ-304

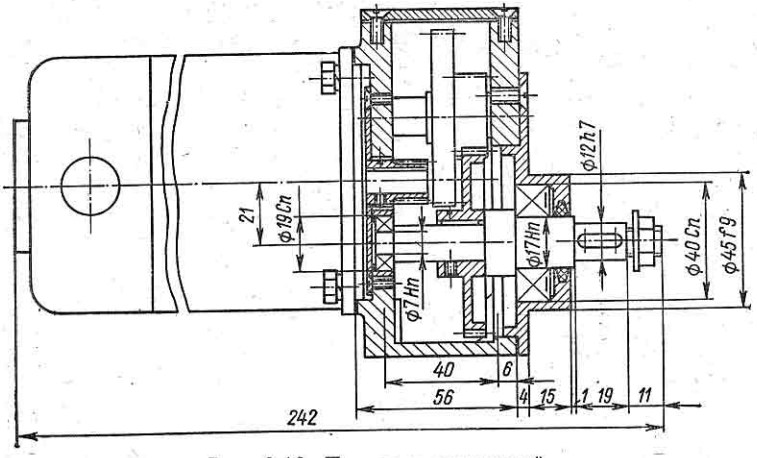


Рис. 2.16. Привод редукторный

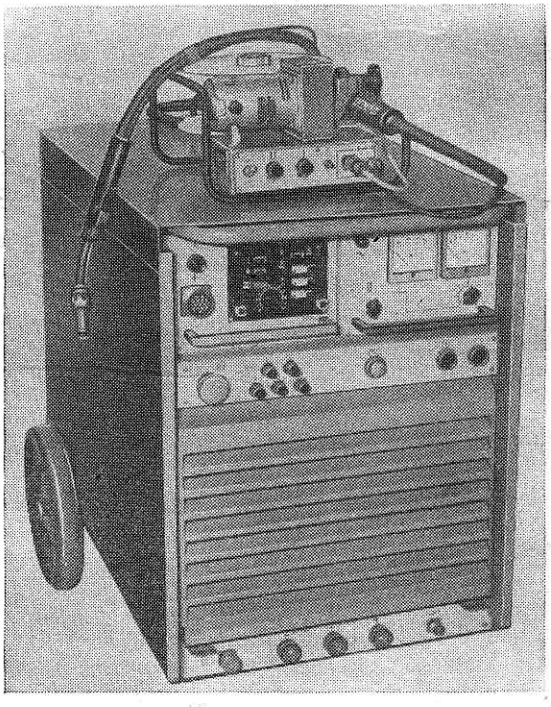


Рис. 2.17. Полуавтомат ПДГ-312

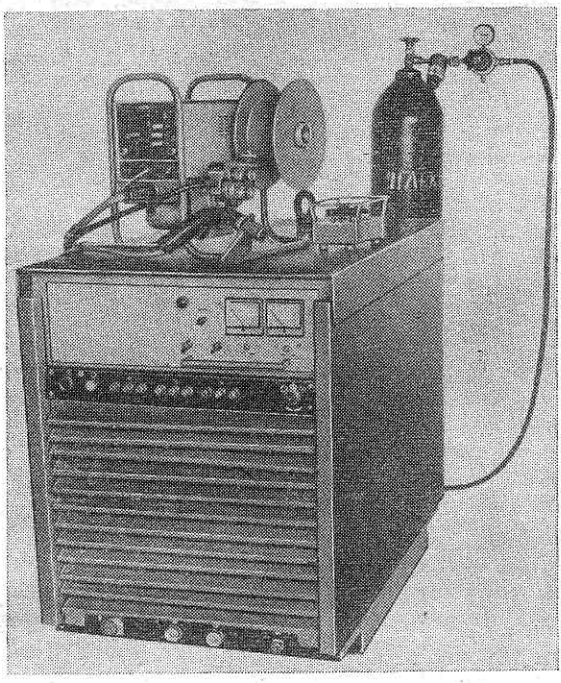


Рис. 2.18. Полуавтомат ПДГ-516

вом корпусе. В приводе применен электродвигатель постоянного тока КПА-561 мощностью 90 или 120 Вт, напряжением 48 В. В сравнении с приводом ПР-1, используемым в автоматах ПДГ-305, ПДГ-502 и других, новый редукторный привод имеет большое передаточное число, у него разнесены опоры выходного вала, увеличен диаметр последнего в месте посадки ведущего ролика.

В полуавтоматах ПДГ-312, ПДГ-515 прижимные устройства закрепляются на цилиндрическом выступе редукторного привода через промежуточную эксцентриковую втулку. При повороте втулки вокруг оси выступа на 180° изменяется межосевое расстояние подающих роликов, и при смене ведущего ролика скорость подачи изменяется в соотношении 1 : 2. Внутри каждой из двух ступеней скорость регулируется плавно изменением частоты вращения двигателя.

Прижимное устройство полуавтоматов ПДГ-312, ПДГ-515 по конструкции соответствует аналогичному устройству полуавтомата ПДГ-308.

В полуавтоматах ПДГ-516 и ПДГ-603 применено четырехроликовое прижимное устройство для подачи как стальной сплошной, так и стальной порошковой проволок. Особенностью этого устройства является быстрая смена подающих роликов.

Полуавтоматы ПДГ-312 (рис. 2.17) и ПДГ-515 имеют одинаковые переносные подающие устройства, блоки управления полуавтоматами БУСП-1, встраиваемые в источники сварочного тока. Разница между полуавтоматами — в источниках питания и комплекте сварочных горелок: в составе полуавтомата ПДГ-312 имеются выпрямитель ВДГ-303 и сварочные горелки ГДПГ-201 и ГДПГ-304, полуавтомат ПДГ-515 комплектуется выпрямителем ВДУ-505 и горелками ГДПГ-304 и ГДПГ-502.

В состав полуавтоматов ПДГ-516 (рис. 2.18) и ПДГ-603 входят переносные подающие механизмы со встроенными блоками БУСП-1. Полуавтоматы комплектуются соответственно выпрямителями ВДУ-504-1 (ВДУ-505) и ВДГ-601 (ВДУ-601), горелками ГДПГ-304 и ГДПГ-502 (ПДГ-516), ГДПГ-304 и ГДПГ-603 (ПДГ-603).

Технические параметры полуавтоматов новой серии соответствуют ГОСТ 18130—79.

2.4. КОНСТРУКЦИЯ АВТОМАТОВ

Автоматы АДГ-502, АДГ-601, АДФ-1001, АДФ-1201. Серия автоматов предназначена для сварки стыковых и угловых соединений и выполнена на базе унифицированных узлов. Автоматы АДФ-1001 и АДФ-1201 предназначены для сварки под флюсом, автомат АДГ-502 — для сварки в среде углекислого газа. Автоматы позволяют осуществлять сварку как внутри колеи, так и вне ее на расстоянии до 200 мм. Размер колеи 295 мм. Конструкция автоматов дает возможность корректировать в поперечном направлении положение электрода относительно стыка в пределах 60 мм. В автоматах для сварки под флюсом положение электрода контролируется с помощью светоуказателя.

Регулирование скорости подачи электродной проволоки и скорости сварки — плавное. Автоматическая система регулирования частоты вращения двигателей позволяет жестко стабилизировать выбранные скорости.

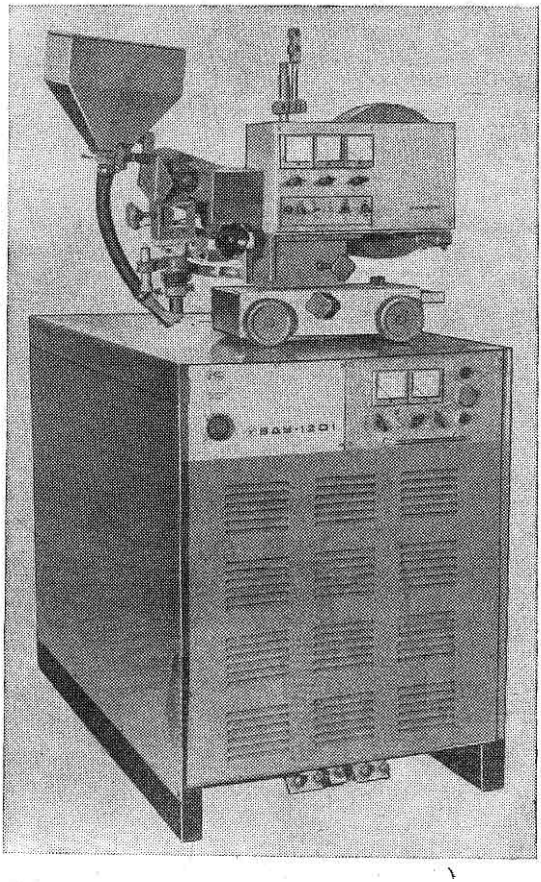


Рис. 2.19. Автомат АДФ-1201

Автоматы комплектуются тиристорными источниками сварочного тока. К основным унифицированным узлам, применяемым в каждом автомате, относятся: тележка, двигатель, редуктор, механизм вертикального перемещения головки, кассетные устройства, пульт управления. Для привода тележки применен двигатель серии КПА мощностью 60 Вт, а для привода механизма подачи электродной проволоки — двигатель 90 Вт той же серии.

На рис. 2.19 показан автомат типа АДФ-1201, а на рис. 2.20 — унифицированные узлы.

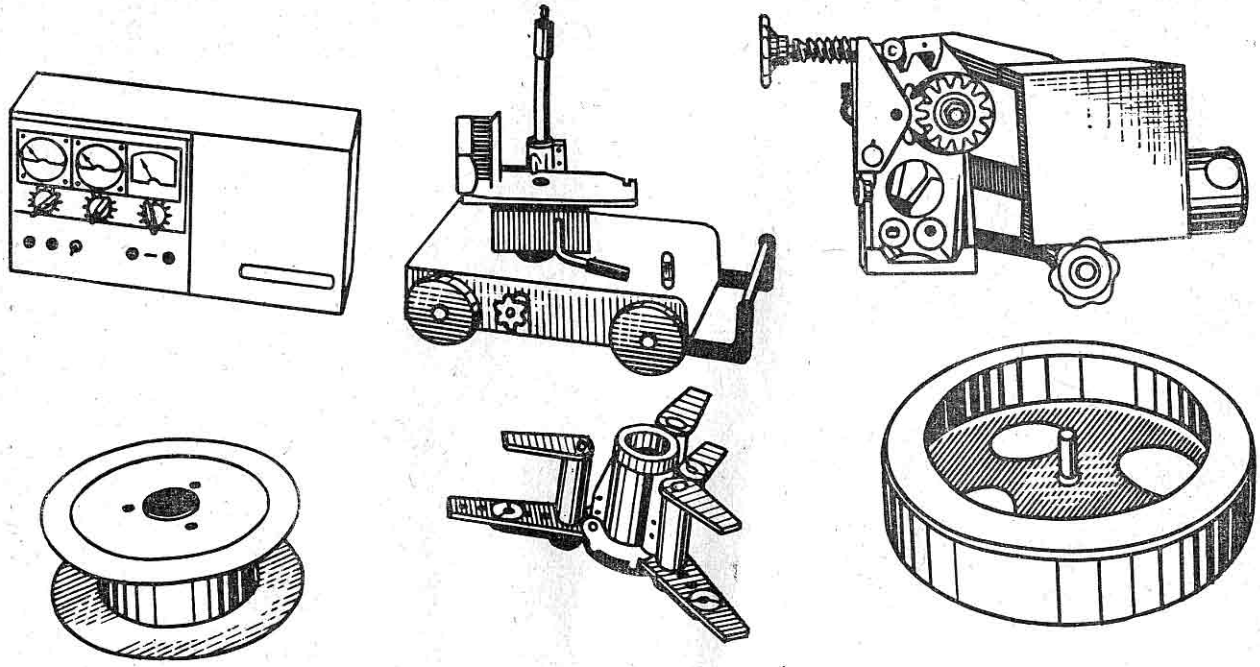
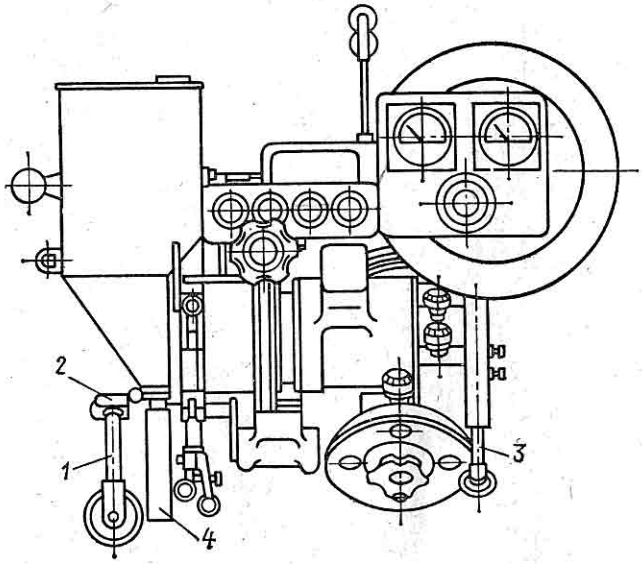


Рис. 2.20. Унифицированные узлы

Автомат АДГ-601 предназначен для сварки соединений с узкой щелевой разделкой кромок глубиной до 100 мм. Автомат имеет направляющие, которые позволяют выполнять прямолинейные швы длиной до 2 м. Во избежание изменения скорости сварки от проскальзывания ведущих колес, направляющие снабжены зубчатой рейкой, сцепленной с ведущим зубчатым колесом сварочного трактора. Особенностью автомата является наличие оригинального устройства для правки проволоки, обеспечивающего степень правки, при которой можно отказаться от ненадежных в работе и быстроизнашивающихся, а также сложных в изготовлении токоподводящих мундштуков, погружаемых в разделку.

Автоматы АДФ-1002 и АДС-1000-4. Автоматы предназначены для сварки под флюсом переменным током и являются оригинальными по конструкции. Автомат АДФ-1002 имеет один асинхронный двигатель, спаренный как с редуктором механизма подачи электродной проволоки, так и с редуктором тележки. Оба механизма представляют собой единый несущий блок. Такое конструктивное решение позволило создать весьма компактный автомат. Скорость подачи электродной проволоки и скорость сварки регулируются сменными шестернями, что является во многих случаях недостатком этой конструкции. Автоматом с соответствующими дополнительными приспособлениями можно производить сварку стыковых соединений без разделки кромок, с разделкой кромок, сварку угловых швов, швов «в лодочку». На рис. 2.21 показана настройка автомата для сварки «в лодочку». Автомат комплектуется тиристорным трансформатором ТДФЖ-1001.

Автомат АДС-1000-4 в отличие от АДФ-1002 имеет плавное регулирование скорости подачи электродной проволоки и скорости сварки и построен по классической двухдвигательной схеме. Автомат позволяет производить сварку стыковых и угловых соединений. При сварке вне колеи имеется возможность сварки «углом вперед» и «углом назад». Электрическая схема регулирования скорости подачи электродной проволоки и скорости сварки основана на применении схемы генератор—двигатель (схемы Леонарда). До 1982 г. автомат выпускался с зависимой от напряжения дуги скоростью подачи электродной проволоки. В настоящее время в связи с применением источника сварочного тока с жесткими внешними характеристиками типа ТДФЖ-1001 автомат переведен на



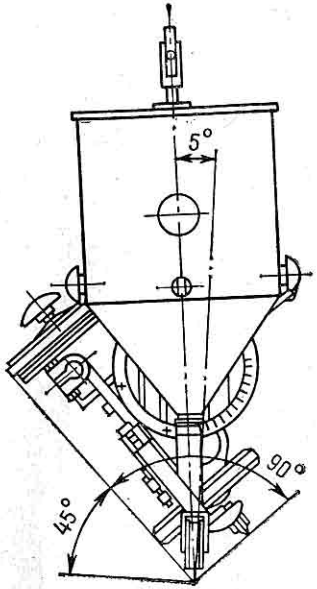


Рис. 2.21. Настройка автомата АДФ-1002 для сварки «в лодочку»

1 — копир для сварки угловых швов «в лодочку»; *2* — штанга коленчатая; *3* — штанга с упорным роликом; *4* — патрубок ссыпной

Таблица 2.3

Параметры	АДГ-502	АДГ-601	АДФ-1001	АДФ-1002	АДФ-1201	АДС-1000-4
Номинальное напряжение питающей сети при частоте 50 Гц, В	220 или 380	380				
Номинальный сварочный ток, А	500	630	1000		1200	1000
Род тока	Постоянный		Переменный		Постоянный	Переменный
Продолжительность включения (ПВ), %	60				100	
Диаметр электродной проволоки, мм	1,2—2,0	2,0—4,0	3,0—5,0	2,0—5,0	2,0—6,0	3,0—5,0
Скорость подачи электродной проволоки, м/ч	120—720	40—600			60—360	
Тип подачи	Независимый				Зависимый	Независимый
Скорость сварки, м/ч	12—120			12—80	12—120	12—150
Источник сварочного тока	Выпрямитель ВДУ-504-1	Выпрямитель ВДГ-601	Трансформатор ТДФЖ-1002		Выпрямитель ВДУ-1201	Трансформатор ТДФЖ-1002
Вид внешних характеристик	Жесткие				Падающие	Жесткие
Пределы регулирования:						
сварочного тока, А	100—500	200—700	300—1200		300—1250	300—1200
рабочего напряжения, В	18—50	18—36	30—56		24—66	30—56
Масса, кг:						
автомата	58	60		45	65	55
источника сварочного тока	385	595	550		850	550
Напряжение холостого хода, В	70	90	120		100	120
Номинальная мощность, кВ·А	40	69	125		135	125
КПД источника, %	82		—	—	—	—

независимую скорость подачи электродной проволоки. Технические параметры автоматов даны в табл. 2.3.

Подвесные самоходные автоматы и сварочные головки. При сварке или наплавке крупных изделий, таких, как балки, цилиндрические сосуды и валы, плоскостные секции, прямошовные и спиральношовные трубы, изделий с однотипными швами и многих других преимущественно в серийном и массовом производстве используются стационарные самоходные автоматы или подвесные сварочные головки. Обычно эти автоматы и подвесные головки входят в состав установок, включающих в себя, кроме собственно сварочного оборудования — автоматов и источников сварочного тока, еще и различного рода манипуляторы, кантователи, служащие для крепления и поворота свариваемых изделий, а также устройства для перемещения изделий в направлении сварки.

В настоящее время выпускаются в серийном производстве подвесные самоходные сварочные автоматы и головки как общего назначения, так и специальные (табл. 2.4). Большинство выпускаемых сварочных автоматов и головок разработано на основе унифицированных узлов. Для многих из них в качестве базовой модели принят созданный в ИЭС имени Е. О. Патона автомат А-1401, являющийся, в свою очередь, дальнейшим усовершенствованием хорошо известного самоходного универсального автомата АБСК.

Автомат А-1216 предназначен для однодуговой сварки под флюсом и состоит из следующих основных узлов:

собственно сварочной головки, содержащей механизм подачи проволоки с правильным устройством, токоподводящий мундштук и устройство для защиты зоны дуги флюсом;

подъемного механизма, позволяющего осуществлять механизированное перемещение подвесной сварочной головки на вертикальной штанге;

флюсоаппарата, снабженного флюсоотсасывающим устройством эжекторного типа;

самоходной тележки велосипедного типа, на которой закреплены узлы автомата и служащей для перемещения его вдоль свариваемого изделия с рабочей и маршевой скоростями.

От автомата А-1401 он отличается ступенчатым регулированием скоростей сварки и подачи электродной проволоки, что выполняется подбором сменных шестерен.

Таблица 2.4

Технические характеристики	Автоматы для сварки					Автоматы для наплавки			
	общего назначения			специальные		общего назначения		специальные	
	А-1416	А-1412	УДФ-1001	А-1411П	ГДФ-1001	А-384МК	А-874Н	А-1406	А-1408
Исполнение	Самоходный				Подвесной		Самоходный	Подвесной	
Защита зоны дуги *	Ф			Г	Ф		Ф, О	Ф, Г, О	Г, О
Число электродов	1	2				1			
Диаметр электродной проволоки, мм	2,5		2,5—3,0	2—4	3—5	3—6	2—6	2—5	1—3
Сварочный ток при ПВ = 100 %, А	1000	2×1600		1000		500	1000		500
Скорость подачи электрода, м/ч	17—558	17—168 55—558	200—530	17—168 55—558	55—558	28,5—125	5—50 23—230	13—133 53—532	17—168 55—558
Регулирование скорости подачи электрода	Ступенчатое	Плавное				Ступенчатое		Плавное	
Скорость сварки (наплавки), м/ч	12—120	24—240	18—50	12—120	—		5—58	—	
Регулирование скорости сварки	Ступенчатое	Плавное		Ступенчатое	—	—	Ступенчатое	—	—
Маршевая скорость, м/ч	950		990	950	—	—	800	—	—
Перемещение сварочной головки:									
вертикальный ход, мм	250			500	250		400	500	250
скорость, м/мин	0,49		0,43			0,25	0,4		0,5
поперечный ход, мм	±75		±60	±130	±75	±50	200	±50	±70

Продолжение табл. 2.4

Технические характеристики	Автоматы для сварки					Автоматы для наплавки			
	общего назначения			специальные		общего назначения		специальные	
	А-1416	А-1412	УДФ-1001	А-1411П	ГДФ-1601	А-384МК	А-874Н	А-1406	А-1408
Объем флюсобункера, дм³	25			—		25			—
Габаритные размеры автомата, мм:									
высота	1820	1920	2270	1650	1845	1600	2300	1700	1110
ширина	815	890	1370	960	1050	850	810	1030	570
длина	1030	1405	1270	890	1680	650	1050	1030	1110
Масса (без проволоки и флюса), кг	365	390	420	350	298	135	300	360	120
Габаритные размеры шкафа, мм:									
высота	1530				1000	1345	860	—	—
ширина	600				366	696	530	—	—
длина	930		975	930	532	930	780	—	—
Масса шкафа, кг	230		400	240	80	296	145	—	—

* Защита зоны дуги: Ф — сварка под флюсом; Г — сварка в среде углекислого газа; О — сварка открытой дугой.

Автомат при сварке перемещается по рельсовому пути на двух колесах, одно из которых ведущее. Маршевое перемещение автомата осуществляется от отдельного двигателя. Автомат выпускается в комплекте с источником сварочного тока — выпрямителем ВДУ-1201.

Самоходный автомат А-1412 (рис. 2.22) предназначен для двухдуговой сварки под флюсом переменным током и комплектуется двумя трансформаторами типа ТДФЖ-2002. Этот автомат конструктивно унифицирован с автоматом А-1401 и содержит те же основные узлы. Технические характеристики автомата приведены в табл. 2.4. Перемещение тележки автомата с маршевой скоростью производится от асинхронного электродвигателя, а с рабочей скоростью — от электродвигателя постоянного тока. Рабочая скорость тележки регулируется за счет изменения частоты вращения электродвигателя в десятикратном диапазоне с помощью тиристорного регулятора. Ведущее колесо тележки связано с самотормозящейся кинематической цепью посредством фрикционного диска, который отпускается при ручном перемещении тележки. От опрокидывания автомат удерживается специальной стойкой, состоящей из двух сварных кронштейнов и ролика.

Для регулирования положения мундштуков в зависимости от уровня сварки и требуемого вылета электродов служит механизм подъема, включающий в себя редуктор и электродвигатель. Реечные шестерни механизма подъема зацепляются за ходовые рейки, прикрепленные вдоль образующих штанги, которая позволяет обеспечить необходимое вертикальное перемещение головки.

Сварка трехфазной дугой применяется для соединения или наплавки деталей большой толщины при необходимости ограничить проплавление основного материала и увеличить количество наплавленного металла. Она обычно производится двумя электродами, причем две фазы подключаются к электродам, а третья — к свариваемому изделию. Трехфазная дуга состоит из трех отдельных дуг, горящих в общем пространстве. Две зависимые дуги горят между каждым электродом и свариваемым изделием, а третья, независимая (косвенная), дуга — между обоими электродами. Схема трехфазной дуги приведена на рис. 2.23.

Если ток I_3 в изделии будет больше тока в каждом электроде $I_1 = I_2$, глубина проплавления будет значительной, а количество расплавленного металла сравни-

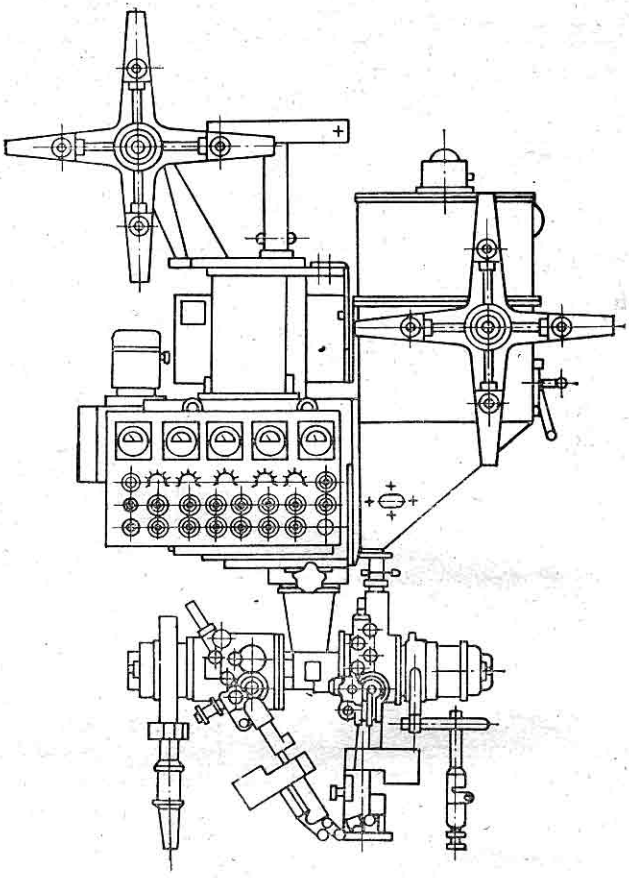
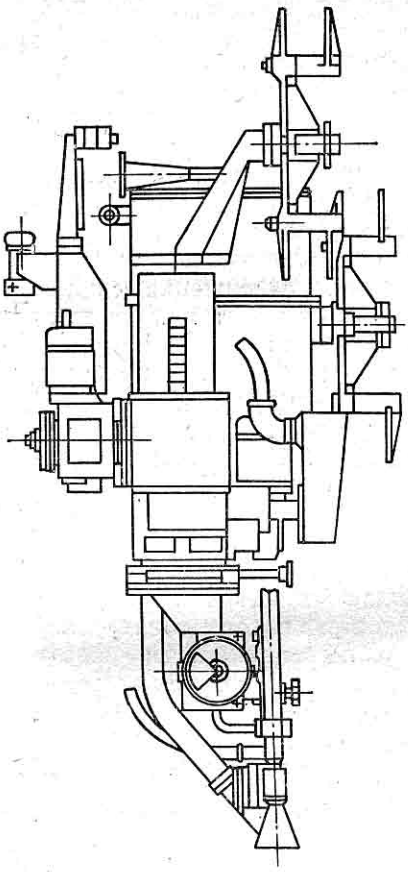


Рис. 2.22. Самоход

тельно невелико; при обратном соотношении глубина проплавления может быть незначительна, а количество расплавленного металла велико. При этом процессе большое значение приобретает расстояние между электродами. Поэтому взаимное их положение регулируется не только в процессе настройки, но и в процессе сварки.

Для сварки и наплавки переменным током под флюсом деталей из низкоуглеродистых, среднеуглеродистых и легированных сталей выпускается самоходный двухэлектродный автомат УДФ-1001У4. Он скомпонован из унифицированных узлов автомата А-1401 и комплектуется



ный автомат А-1412

трансформатором ТШС-1000-3. Основными узлами автомата являются: механизмы подъема, подачи проволоки, тележка, механизм изменения расстояния между электродами, правильное устройство, флюсоаппарат с бункером и трубопроводом для подачи флюса, катушки с тормозными устройствами. Автомат снабжен световым указателем и пультом управления. Механизм подачи электродных проволок, обеспечивающий одинаковую скорость подачи обеих проволок, представляет собой трехступенчатый редуктор, который приводится в движение электродвигателем постоянного тока мощностью 230 Вт.

Автомат УДФ-1001 имеет специальные механизмы правки проволоки (рис. 2.24) и изменения расстояния между электродами. Правка электродной проволоки производится в направлении вращения (в каналах). Вращение канала осуществляется двигателем через конические шестерни. Настройка правильного механизма производится перемещением спирали гайками. К нижним частям правильных механизмов прикреплены бронзовые корпуса токоподводов, в которые вставлены наконечники. Один из правильных механизмов имеет устройство, позволяющее регулировать расстояние между концами электродов. Оба правильных механизма через системы рычагов связаны с механизмом изменения расстояния между электродами. Он представляет собой продольно перемещающийся ходовой винт, к которому шарнирно прикреплены рычаги, соединенные с корпусами правильных ме-

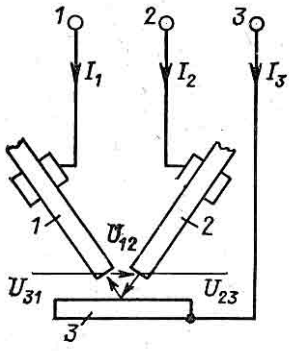


Рис. 2.23. Схема трехфазной дуги

ханизмов. При перемещении винта, происходящем при ввинчивании в гайку, вращаемую двигателем, и вывинчивании из нее, рычаги тянут за собой корпуса правильных механизмов, которые, поворачиваясь вокруг осей подающих роликов, изменяют расстояние между концами электродов. Для ограничения перемещения механизма раздвижения служат концевые выключатели. Расстояние между концами электродных проволок при вылете проволок из наконечника 50 мм регулируется в пределах ± 10 мм со скоростью не менее 10 мм/с. Оптимальный угол между электродами установлен 30—45°.

Так как при сварке трехфазной дугой на стабильность процесса влияет большое число параметров режима, то их регулирование должно производиться весьма тщательно. Регулирование тока в электродах при сварке с независимой от напряжения дуги скоростью подачи электродной проволоки производится изменением скорости подачи с помощью регулятора «электроды — скорость», расположенного на пульте. Постоянство тока в электродах поддерживается саморегулированием дуги и обеспечивается автоматическим изменением в процессе сварки расстояния между электродами. Для увеличения интенсивности саморегулирования дуги источник сварочного тока имеет жесткие внешние характеристики. Регулирование напряжения осуществляется ступенчато в пределах 38—62 В переключением отпаек на сварочном трансформаторе.

Автомат УДФ-1001У4 позволяет выполнять сварку в нижнем положении стыковых и угловых соединений «в лодочку».

К специальным подвесным самоходным автоматам и сварочным головкам, выпускаемым в серийном производстве, относятся автомат А-1411ПУ4 и головка ГДФ-1001У3.

Самоходный автомат А-1411ПУ4 предназначен для сварки угловых швов наклонным электродом в защитных газах, и им комплектуются сварочные установки и автоматические линии, на которых производится сварка изделий с угловыми продольными швами. Автомат оснащен

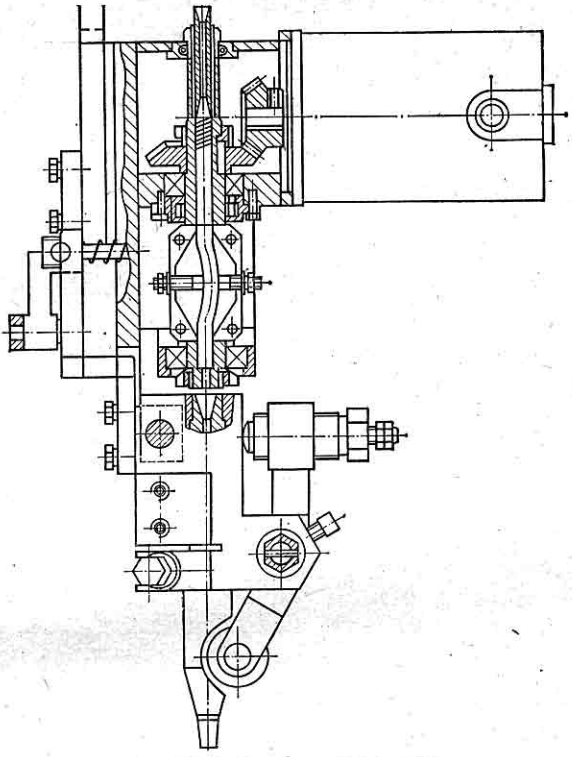


Рис. 2.24. Автомат УДФ-1001

электромеханической системой поиска линии соединения и начала шва, устройством механического копирования линии шва и системой заварки кратера. Все операции цикла сварки, включая возврат автомата в исходное положение на маршевой скорости, автоматизированы.

Автомат имеет два исполнения — правое и левое, соответствующие требуемому направлению сварки. Электрическая схема разработана на правое и левое исполнение автомата, а также предусматривает возможность подключения и работы одновременно нескольких автоматов правого, левого или смешанного исполнения с одного пульта. Автомат комплектуется шкафом управления, выпрямителем ВДУ-1201, газовой контрольно-регулировочной аппаратурой с подогревателем газа, кабелем управления. Сварочный кабель и газоподвод собирают

в гирлянду и подвешивают в верхней части сварочной установки, обеспечивая свободу перемещения сварочного автомата от начала шва и до его конца.

В автомате также используются унифицированные узлы. Маршевая и рабочая скорости тележки обеспечиваются электродвигателями переменного тока.

Особенностью конструкции автомата является копирное устройство. Оно состоит из литого корпуса, внутри которого смонтированы два взаимосвязанных и взаимно перпендикулярных параллелограмма. На торце корпуса укреплен кольцевой электромагнит, электрически связанный с конечным выключателем, установленным на тележке. С двух противоположных сторон параллелограмма, имеющего две степени свободы, укреплены штанги с конечными выключателями и копирным роликом с мундштуком.

Электрическая схема управления предусматривает два режима работы автомата: «ручной» с кнопочным управлением всеми механизмами автомата и «полуавтомат», при котором технологическая последовательность операций осуществляется автоматически. По окончании цикла «Сварка» автомат возвращается в исходное положение. При использовании автомата в автоматических линиях его пуск может производиться от внешнего сигнала. Возможен раздельный поиск шва: сначала горизонтальной плоскости, затем вертикальной плоскости. Направление поиска выбирается переключателем «Поиск шва».

Головка ГДФ-1001УЗ предназначена для дуговой автоматической сварки плавящимся электродом под слоем флюса стыков труб диаметром 529—1420 мм из углеродистой и низколегированной сталей для нефтегазопроводов и входит в состав оборудования полевой автосварочной установки ПАУ-1001.

При сварке поворотных стыков сварочная головка неподвижна, а трубы вращаются с помощью шпиндельного или роликового вращателя. В головках для сварки труб большого диаметра применяются следящие системы для управления движением горелок. Основные составные части горелок для сварки поворотных стыков труб такие же, как у автоматов общего применения, и также скомпонованы из унифицированных узлов.

В состав головки входят: механизмы подъема, подачи проволоки, правильно-прижимной, система слежения за линией стыка, суппорты продольного и поперечного пере-

мещений, флюсоаппарат с бункером, катушки для проволоки с тормозным устройством, пульт управления, опорные ролики, горелка и светоуказатель. Электрооборудование головки позволяет осуществлять работу в полуавтоматическом и наладочном режимах. Головка выпускается в комплекте со сварочным выпрямителем ВДУ-1201 с дистанционным подключением управления.

Особенностью автоматов для наплавочных работ является наличие специальных устройств для выполнения широкослойной наплавки ленточным электродом или расщепленным электродом из нескольких проволок, расположенных поперек движения автомата, порошковым электродом или электродом, совершающим поперечные колебательные движения. Автоматы для наплавки обычно рассчитываются на длительную, без перерывов работу. Серийно выпускаются в настоящее время для этих целей автоматы общего применения типа А-384МК, А-874Н и специальные А-1406, А-1408.

Подвесной автомат (головка) типа А-384МК предназначен для автоматической поверхностной наплавки под слоем флюса порошковой проволокой диаметром 3—6 мм либо лентой шириной 20—100 мм и толщиной 0,2—1,2 мм тел вращения или плоских деталей. Автомат скомпонован на базе узлов автомата АБСК из подвесной головки и подъемного механизма с флюсоаппаратом и отличается от него наличием механизма вертикального перемещения и набором приставок для наплавки порошковой проволокой, ленточным электродом и гребенкой проволок. Скорость подачи электродной проволоки постоянная, не зависит от напряжения дуги. Настройка на заданную скорость подачи электродной проволоки производится с помощью сменных шестерен механизма подачи. Автомат закрепляется на станке, осуществляющем вращение изделия, перемещение на заданный шаг наплавки либо другие соответствующие движения, обеспечивающие наплавку поверхности. Комплектуется сварочным выпрямителем ВДУ-504.

Самоходный автомат А-874НУ4 служит для наплавки тел вращения, плоских деталей и изделий сложной формы. Широкие технологические возможности автомата обеспечиваются комплектом сменных узлов и приставок, а также системой управления, позволяющей вести наплавку с независимой скоростью подачи или с автоматическим регулированием скорости в зависимости от напряжения дуги.

Рассчитан на длительную непрерывную работу. Входящие в комплект автомата сменные узлы и приставки позволяют выполнять следующие операции: наплавку проволочным электродом, широкослойную наплавку проволочным электродом с поперечными колебаниями и лентой, наплавку тел вращения с импульсным перемещением тележки на шаг наплавки.

Наплавка может производиться как под флюсом, так и открытой дугой сплошной проволокой диаметром 2,5—6 мм, порошковой диаметром 2—3,5 мм, горячекатаной проволокой (катанкой) диаметром 6—7 мм из легированных сталей, а также лентой шириной 15—70 мм и толщиной 0,5—1,0 мм. В комплект поставки автомата входят самоходная головка, шкаф управления и сварочный выпрямитель типа ВДУ-1201.

Основными узлами автомата являются самоходная тележка, механизмы подъема, поперечных колебаний, устройство (суппорт) для перемещения электрода вдоль на 90 мм и поперек шва на 200 мм, флюсоаппарат, мундштук с держателем, катушка для проволоки с тормозом и пульт управления.

Самоходная тележка передвигается с рабочей и маршевой скоростями по рельсовому пути, расположенному в вертикальной плоскости; рабочее перемещение — со скоростью наплавки и маршевое — для быстрых установочных перемещений. В приводе тележки имеется пара сменных шестерен для настройки скорости наплавки. Правильный механизм выполнен в виде пяти роликов на игольчатых подшипниках, насаженных на эксцентриковые пальцы. При наплавке правильный механизм снимается и вместо него устанавливается сменная направляющая втулка.

Конструктивно объединен с правильным механизмом держатель мундштука. Мундштук позволяет наплавлять плоские и круглые детали сплошной и порошковой проволокой, катанкой на токах 700—800 А. К боковой части мундштука на шарнире крепится медный рычаг токоподвода. В нижнюю часть мундштука завинчиваются сменные наконечники для различных диаметров сварочной проволоки. Для наплавки лентой автомат снабжается специальной приставкой. Подача электродной ленты к сварочной ванне происходит между двумя омедненными стальными пластинами с угольниками, устанавливаемыми в зависимости от ширины ленты.

Механизм поперечных колебаний представляет собой двигатель с червячным редуктором, выходной вал которого при помощи торцевой шпонки соединяется с червячным валом поперечного корректора суппорта. В кинематической цепи редуктора имеется пара сменных шестерен, при помощи которых устанавливается скорость поперечных колебаний.

На базе унифицированных узлов автомата А-1401 выпускаются специальные наплавочные автоматы, предназначенные для комплектации различных станков и установок. Наиболее универсальный из них автомат А-1406. Он входит в комплект станков, на которых выполняется наплавка наружных, внутренних поверхностей цилиндрических и конических тел вращения, а также деталей с плоскими поверхностями. При помощи автомата, установленного на станке, можно также сваривать детали, имеющие кольцевые и продольные швы простой конфигурации.

Автомат позволяет производить наплавку и сварку под слоем флюса одинарным и расщепленным электродами, открытой дугой порошковыми проволоками и лентой, а также в среде защитного газа. Механизм поперечных колебаний с приводом от электродвигателя позволяет обеспечить колебания электрода с амплитудой 15—70 мм и ручное смещение центра колебаний на ± 50 мм. Скорость колебаний в пределах 80—200 м/ч регулируется с помощью сменных шестерен.

Автомат оснащен дополнительными приспособлениями для внутренней наплавки в среде углекислого газа. Наплавка внутренних цилиндрических поверхностей диаметром свыше 100 мм и длиной до 500 мм производится открытой дугой. Кроме основного мундштука для сварки под флюсом, в комплект автомата входят мундштуки для сварки порошковой проволокой, порошковой лентой и расщепленным электродом. Автомат комплектуется сварочным выпрямителем ВДУ-1201. Так как автомат предназначен для работы с наплавочными станками, то управление им осуществляется по электрическим схемам этих станков.

Автомат А-1408 предназначен для комплектации станка, на котором производится наплавка в среде защитного газа или открытой дугой порошковой проволокой деталей типа валов диаметром 20—150 мм, длиной до 1200 мм. Автомат состоит из механизмов подъема, подачи, колебаний,

вращения, кассеты с тормозным устройством, мундштука и суппорта для корректировки положения мундштука в поперечном направлении (смещение с зенита). Колебания электродной проволоки осуществляются за счет эксцентриков, устанавливаемых на вал механизма подачи. Имеются два эксцентрика, обеспечивающие амплитуды колебаний 9—16 и 18—32 мм. Механизм вращения предназначен для изменения вручную угла наклона мундштука в пределах $\pm 30°$ к вертикали.

В комплект автомата входят приспособление для наплавки в среде углекислого газа, состоящее из мундштука, отсекателя газа, углекислотного редуктора и подводящих рукавов, а также прижимной механизм, служащий для прижима проволок к подающему ролику и разведения концов мундштука при наплавке расщепленным электродом. Автомат комплектуется сварочным выпрямителем ВДУ-504. Так как автомат предназначен для работы с наплавочным станком, то управление им осуществляется по электрической схеме станка.

2.5. БЛОКИ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛУАВТОМАТАМИ И АВТОМАТАМИ. ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

К применяемым в настоящее время в сварочных автоматах и полуавтоматах электродвигателям предъявляются следующие требования:

Напряжение питания, В, не более	110 постоянного тока, 42 переменного тока
Ряд мощностей, Вт	40, 60, 90, 120, 180, 250
Продолжительность включения (ПВ), %, не менее	60 для полуавтоматов, 100 для автоматов
Диапазон изменения частоты вращения, отн. ед., не менее	10
Пульсация ЭДС якоря, %, не более	10
Степень защиты по ГОСТ 17494—72	IP20 для полуавтоматов, IP44 для автоматов

Как известно, напряжение $U_я$, приложенное к якорю двигателя, уравновешивается падением напряжения на обмотке якоря и ЭДС, наводимой в этой обмотке при вращении якоря, т. е.

$$U_я = I_я R_я + E, \tag{2.21}$$

где $I_я$ — ток в якорной цепи; $R_я$ — активное сопротивление обмотки якоря; E — ЭДС в обмотке якоря, равная

$$E = C_e \Phi n, \tag{2.22}$$

где C_e — коэффициент, определяющий зависимость ЭДС от конструкции двигателя; Φ — магнитный поток индуктора двигателя; n — число оборотов двигателя в единицу времени.

Кроме того, в настоящее время стало обязательным требование плавной (неступенчатой) установки скоростей подачи проволоки и перемещения сварочной каретки, что, в свою очередь, определяет необходимость плавного регулирования частоты вращения исполнительных двигателей.

Наиболее полно всем перечисленным выше требованиям удовлетворяют электродвигатели постоянного тока с независимым возбуждением, и именно они являются основным типом двигателей, применяемых в сварочных автоматах и полуавтоматах. Исключение составляют автоматы и полуавтоматы со ступенчатым изменением скоростей с помощью редуктора, в которых используются асинхронные электродвигатели. Эти автоматы и полуавтоматы еще выпускаются и применяются в промышленности, но в ближайшие годы будут заменены оборудованием с плавным регулированием на базе двигателей постоянного тока, что, как уже говорилось, является настоятельным требованием технологии сварки и определяет технический уровень сварочного оборудования.

Плавное регулирование частоты вращения асинхронных двигателей требует сложной, громоздкой аппаратуры управления, и поэтому, несмотря на высокие эксплуатационные качества самих асинхронных двигателей, оно не применяется ни в отечественном, ни в зарубежном оборудовании для дуговой сварки.

Рассмотрим некоторые свойства двигателей постоянного тока с независимым возбуждением.

Подставив выражение (2.22) в (2.21) и решив полученное уравнение относительно n, имеем

$$n = \frac{U_я}{C_e \Phi} - \frac{I_я}{C_e \Phi} R_я. \qquad (2.23)$$

Выражение (2.23) показывает, что управлять частотой вращения двигателя постоянного тока с независимым возбуждением можно тремя способами: изменением подводимого к якорю напряжения $U_я$; изменением магнитного потока Ф; изменением сопротивления цепи якоря $R_я$. Из этого же выражения видно, что наиболее выгоден первый способ управления, так как между частотой вращения и напряжением, подводимым к якорю $U_я$, существует пропорциональная связь. Второй способ, связанный с изменением магнитного потока, практически не применяется из-за необходимости управлять током обмотки возбуждения, обладающей значительной индуктивностью, и невозможности изменять магнитный поток в широких пределах. Изменение сопротивления в цепи якоря на практике используется редко из-за сложности плавного изменения сопротивления при автоматическом управлении и сильной зависимости частоты вращения якоря от тока при больших значениях $R_я$.

Во всех современных автоматах и полуавтоматах с плавным регулированием скоростей подачи электродной проволоки и перемещения сварочной каретки применяется способ изменения подводимого к якорю напряжения.

Силовой характеристикой электродвигателя является момент M на валу, который определяется выражением

$$M = C_M \Phi I_я, \qquad (2.24)$$

где C_M— коэффициент, определяющий зависимость момента на валу двигателя от его конструкции; Ф — магнитный поток; $I_я$ — ток в цепи якоря.

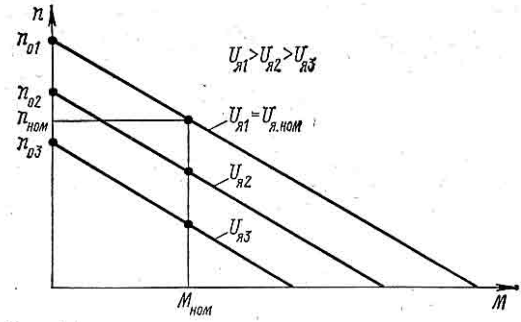


Рис. 2.25. Семейство механических характеристик двигателя постоянного тока

Решив уравнение (2.24) относительно $I_я$ и подставив в (2.23), получим

$$n = \frac{U_я}{C_e\Phi} - \frac{M}{C_eC_M\Phi^2} R_я. \qquad (2.25)$$

Выражение (2.25) называется механической характеристикой двигателя и при различных $U_я$ представляет собой семейство таких характеристик. Графически это семейство представлено на рис. 2.25. На этом рисунке n_{01}, n_{02}, n_{03} — частоты вращения якоря при напряжениях $U_{я1}$, $U_{я2}$, $U_{я3}$ соответственно и при идеальном холостом ходе, т. е. при $M^3 = 0$; $M_{ном}$ — номинальный момент на валу якоря; $n_{ном}$ — номинальная частота вращения якоря; $U_{я.ном}$ — номинальное напряжение якоря.

Таблица 2.5

Тип электродвигателя	Номинальная мощность, Вт	Номинальное напряжение якоря и обмотки возбуждения, В	Номинальная частота вращения, об/мин	Коэффициент полезного действия, %	Режим работы по ГОСТ 183—74	Степень защиты по ГОСТ 17494—72
КПА-560А	60	24	5000	39	ЗПВ 60 %	IP20
КПА-561	90	48		52		
КПА-563	120			60		
КПА-632	250			62		
КПК-562	60			56	1	IP44
КПК-564	90			58		
КПК-632	180			62		

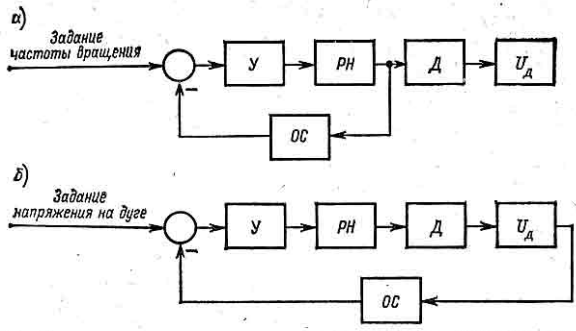


Рис. 2.26. Структурные схемы электроприводов, применяемых в автоматах и полуавтоматах дуговой сварки

Величина $\Delta n = \frac{n_{01} - n_{ном}}{n_{ном}} 100$ в процентах называется номинальным изменением частоты вращения двигателя и характеризует зависимость этой частоты от изменения момента на валу двигателя.

В настоящее время наиболее широко в автоматах и полуавтоматах применяются электродвигатели серий КПА и КПК, специально разработанные для дугового электросварочного оборудования. Основные технические данные двигателей приведены в табл. 2.5.

Узлы управления частотой вращения электродвигателей. Как отмечалось выше, управление частотой вращения электродвигателей постоянного тока сводится к изменению подводимого к якорю двигателя напряжения по необходимому закону, определяемому назначением электропривода.

В автоматах и полуавтоматах электроприводы по своему назначению делятся на два типа:

электроприводы для управления скоростями подачи электродной проволоки и перемещения сварочной каретки и их стабилизации;

электроприводы для управления напряжением дуги и его стабилизации — так называемые электроприводы зависимой от напряжения дуги подачи электродной проволоки.

Оба типа этих электроприводов в современных автоматах и полуавтоматах представляют собой автоматические системы управления, причем первая из них является системой стабилизации, а вторая — следящей. Структурные схемы этих систем представлены на рис. 2.26, а технические требования, предъявляемые к ним, даны ниже:

Диапазон изменения частоты вращения электродвигателя, отн. ед., не менее 10

Точность стабилизации частоты вращения электродвигателя во всем диапазоне при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной и колебаниях напряжения питающей сети в пределах +5 ... —10 % от номинального значения, %, не ниже 10

Точность стабилизации напряжения дуги при изменении нагрузки на электродвигатель от холостого хода до номинальной и колебаниях напряжения питающей сети в пределах +5 ... —10 % от номинального значения, %, не ниже . . . . . ±8

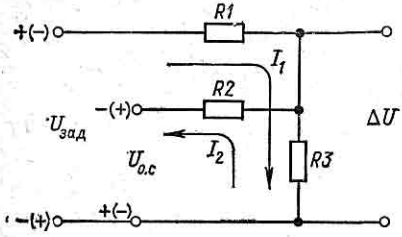


Рис. 2.27. Схема устройства сравнения

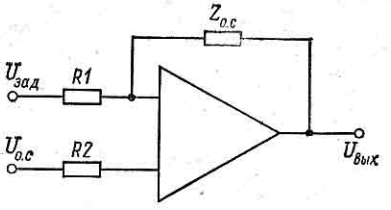


Рис. 2.28. Принципиальная схема интегрального усилителя постоянного тока

Из приведенных структурных схем видно, что необходимый закон изменения напряжения на якоре электродвигателя обеспечивается сигналом обратной связи *ОС*, снимаемым с входных зажимов якоря (в схеме рис. 2.26, *а*) и с дугового промежутка (в схеме рис. 2.26, *б*). Этот сигнал сравнивается с сигналом задания в устройстве сравнения, а полученная на выходе последнего разность с учетом знака через усилитель *У* управляет регулятором напряжения *РН*.

Рассмотрим звенья, входящие в структурные схемы.

Устройство сравнения в практических системах представляет собой схему вычитания двух напряжений и часто реализуется на трех резисторах по схеме рис. 2.27. В этой схеме

$$\Delta U = (I_1 - I_2)\, R_3. \tag{2.26}$$

Если $R_1 = R_2 \gg R_3$, что и выполняется на практике, то

$$\Delta U \approx \frac{R_3}{R}\,(U_{\text{зад}} - U_{\text{о. с}}). \tag{2.27}$$

Величина $R_3/R \ll 1$, и поэтому в приведенной на рис. 2.27 схеме после сравнения требуется усиление сигнала с большим коэффициентом усиления. На практике для этой цели применяются усилители постоянного тока. В системах управления более ранних разработок они реализованы на транзисторах, а в последних разработках используются интегральные усилители постоянного тока. Эти усилители, называемые операционными, практически не имеют недостатков, присущих усилителям постоянного тока на дискретных компонентах. Обладая высоким коэффициентом усиления, большим входным сопротивлением и имея два входа (неинвертирующий и инвертирующий), они объединяют в себе функции сравнения и усиления сигналов, а также функции коррекции управляющих воздействий. Последнее позволяет простыми средствами формировать требуемые законы регулирования, обеспечивая тем самым необходимые статические и динамические свойства электроприводов.

Принципиальная схема интегрального усилителя постоянного тока, объединяющего в себе функции сравнения двух напряжений, усиления и коррекции, приведена на рис. 2.28.

В качестве регуляторов напряжения, подводимого к якорю двигателя, наиболее широко в настоящее время используются тиристорные

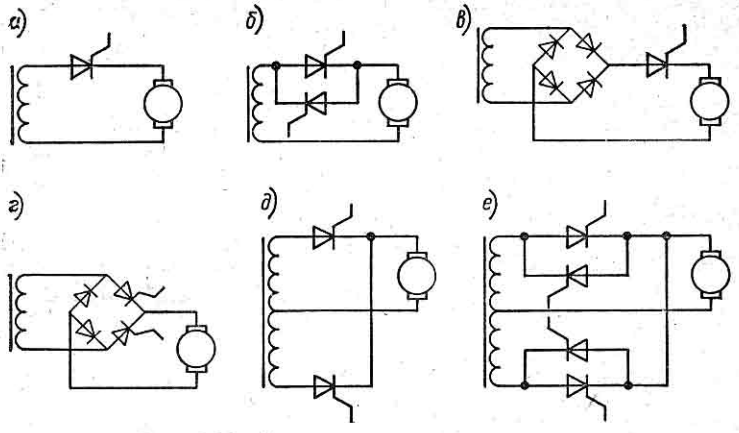


Рис. 2.29. Схемы регуляторов напряжения

преобразователи. В этих преобразователях управление напряжением на их выходе осуществляется путем изменения фазы включения тиристоров.

Таким образом, тиристорный регулятор напряжения состоит из преобразователя управляющего напряжения в фазу включающего тиристор импульса и силовой части — трансформатора и тиристоров. В схемах автоматов и полуавтоматов питание и управление тиристорных регуляторов напряжения осуществляются на частоте питающей сети.

В зависимости от схемы силовой части регуляторы напряжения можно разделить на однополупериодные нереверсивные (рис. 2.29, *а*), однополупериодные реверсивные (рис. 2.29, *б*), двухполупериодные нереверсивные с одним тиристором (рис. 2.29, *в*), двухполупериодные нереверсивные с управляемым мостом (рис. 2.29, *г*), двухполупериодные нереверсивные со средней точкой обмотки силового трансформатора (рис. 2.29, *д*) и двухполупериодные реверсивные со средней точкой обмотки силового трансформатора (рис. 2.29, *е*). На практике наиболее широко применяются схемы рис. 2.29, *в*, *г*, *д*, *е*.

Зависимость среднего значения напряжения на выходе тиристорного преобразователя за половину периода напряжения питающей сети от фазы включения тиристоров определяется по формуле

$$U_{\text{ср}} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} u_m \sin \omega t \, d\omega t = \frac{u_m}{\pi} (1 + \cos \alpha). \qquad (2.28)$$

Приведенное выражение показывает, что за счет изменения фазы включения тиристора среднее значение напряжения за половину периода напряжения питающей сети можно изменять в пределах от 0 при $\alpha = \pi$ до значения

$$\frac{u_m}{\pi} (1 + \cos \alpha_{\min}). \qquad (2.29)$$

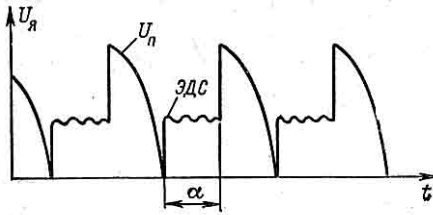


Рис. 2.30. Осциллограмма напряжения на зажимах двигателя при питании от двухполупериодного тиристорного преобразователя

Величина α_{min} определяется видом нагрузки, на которую работает тиристорный преобразователь. При работе на активную нагрузку α_{min} практически равно нулю, так как в этом случае тиристор может быть включен в самом начале полуволны питающего напряжения.

При работе на нагрузку с противо-ЭДС, какой является электродвигатель постоянного тока, α_{min} есть фаза, при которой мгновенное значение питающего напряжения превышает ЭДС двигателя на величину, достаточную для надежного включения тиристора. Осциллограмма напряжения на зажимах якоря двигателя при питании его от двухполупериодного тиристорного преобразователя приведена на рис. 2.30. Из этой осциллограммы видно, что питающее якорную цепь напряжение имеет прерывистую форму и при глубоком регулировании (при α, близких к π) и малых индуктивностях в цепи якоря может привести к режиму прерывистых токов якоря. Этот режим является нежелательным, так как вызывает повышенный перегрев двигателя. Положительным свойством прерывистости выходного напряжения тиристорного преобразователя является то, что имеются промежутки времени, в которые можно изменить ЭДС якоря, т. е. частоту его вращения. Это и используется на практике в системах стабилизации частоты вращения.

Таким образом, изменяя фазу включения тиристоров, можно изменять в достаточно широких пределах напряжение, подводимое к якорю двигателя, т. е. изменять частоту вращения последнего.

Для управления фазой включения тиристоров используются преобразователи управляющего напряжения в фазу включающего импульса. Эти преобразователи работают по схемам временных задержек, момент появления сигнала на выходе которых зависит от значения входного напряжения. В практических схемах управления автоматами и полуавтоматами для управления фазой включения тиристоров используются *RC*-цепи, включенные на вход пороговой схемы, срабатывающей при достижении определенного уровня напряжения на конденсаторе, или на вход схемы сравнения пилообразного напряжения с управляющим.

Узлы управления сварочными циклами. Узлы управления сварочными циклами предназначены для автоматического управления последовательностью и продолжительностью включения исполнительных органов автоматов и полуавтоматов. Они представляют собой логическо-временные устройства, в которых связи между элементами определяют логику работы, а сами элементы обеспечивают переключение этих устройств из одного состояния в другое.

Узлы управления сварочными циклами строятся на базе логических схем, запоминающих устройств, схем временных задержек, усилителей мощности и согласующих элементов.

Логическими называются схемы, состояние выходного сигнала которых зависит от определенного состояния сигналов на их входах. Под состоянием сигнала понимается один из двух возможных его уровней — низкий или высокий. Сигнал низкого уровня обозначается ну-

лем (0), а сигнал высокого уровня — единицей (1). Наиболее часто употребляются логические схемы И, ИЛИ, НЕ.

Схема И — схема логического умножения (совпадения), имеет один выход и не менее двух входов. Сигнал на выходе этой схемы равен 1 только тогда, когда равны 1 сигналы на всех ее входах.

Схема ИЛИ — схема логического сложения, имеет один выход и не менее двух входов. Сигнал на выходе схемы равен 1, когда равен 1 сигнал хотя бы на одном, на нескольких или на всех ее входах.

Схема НЕ — схема логического отрицания (инверсии), имеет один вход и один выход. Сигнал на выходе равен 0, когда сигнал на входе равен 1, и наоборот.

Схемы, реализуемые на дискретных компонентах, строятся: схемы И или ИЛИ — на диодах (рис. 2.31, *а*, *б*), а схемы НЕ — на транзисторах (рис. 2.31, *в*).

В настоящее время логические схемы широко выпускаются в интегральном исполнении и представляют собой комбинации И—НЕ и ИЛИ—НЕ. Изображение логических схем на чертежах показано на рис. 2.32.

Запоминающие устройства используются для блокировки кнопок, запускающих сварочный цикл, с целью доработки его до конца независимо от момента поступления команды на окончание сварки. Они реализуются на триггерных схемах. Применяются триггеры на дискретных транзисторах или в интегральном исполнении. В интегральном исполнении имеются *RC*-триггеры, *JK*-триггеры, *JKRC*-триггеры, *T*-триггеры, *D*-триггеры. Обозначение триггеров на чертежах показано на рис. 2.33.

Схемы задержки времени обеспечивают задержку выходного сигнала относительно входного на заданный промежуток времени. Основным элементом схемы задержки времени является *RC*-цепь, конденсатор которой подключен ко входу порогового устройства. Таким устройством может служить триггер с эмиттерной связью или компаратор на основе операционного усилителя.

Схемы задержки времени строятся как с зарядом, так и с разрядом конденсатора. В первом случае время t заряда конденсатора C через

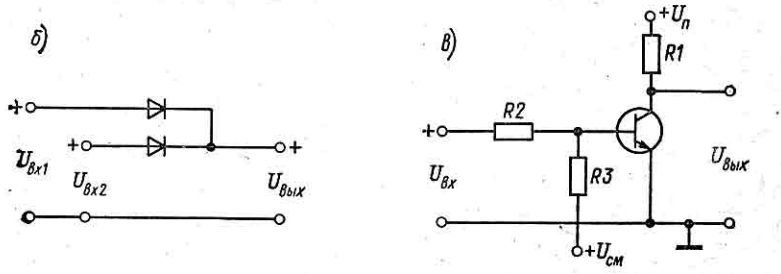


Рис. 2.31. Примеры построения логических схем

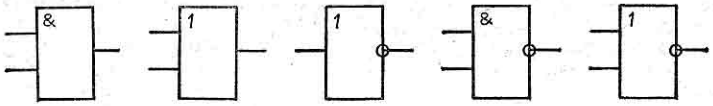


Рис. 2.32. Изображение логических схем на чертежах

резистор R до напряжения срабатывания $U_{ср}$ порогового устройства определяется по формуле

$$t = RC \ln \frac{U_п}{U_{ср}}. \qquad (2.30)$$

Во втором случае время разряда конденсатора определяется как

$$t = RC \ln \frac{U_п}{U_0 - U_{ср}}, \qquad (2.31)$$

где $U_п$ — напряжение источника питания заряжаемого конденсатора.

Так как величины $U_{ср}$ и $U_п$ постоянные для данной схемы, то изменять время задержки можно только за счет изменения R. Это и используется на практике. Принципиальная схема задержки времени с компаратором на операционном усилителе приведена на рис. 2.34. Запуск схемы осуществляется отключением конденсатора C от цепи заряда ключом S. Конденсатор разряжается через резистор R, и в момент, когда напряжение на нем сравняется с опорным, равным $U_р R_2/(R_1 + R_2)$, выходное напряжение схемы изменит знак.

Усилители мощности и согласующие элементы предназначены для преобразования слабых сигналов, поступающих с логических схем и схем временных задержек, в сигналы, достаточные по мощности для включения исполнительных органов автомата или полуавтомата. Усилители мощности реализуются на транзисторах, а согласующие элементы — на оптронных тиристорах, импульсных трансформаторах и реле.

Блок управления сварочными полуавтоматами БУ-01. Для управления полуавтоматами ПДГ-601 применяется блок БУ-01. Он обеспечивает управление циклом работы полуавтомата и стабилизацию установленной скорости подачи электродной проволоки. Циклограмма работы блока приведена на рис. 2.35, где τ_1 — выдержка времени на продувку газового тракта защитным газом перед сваркой; τ_2 — выдержка времени на растяжку дуги; τ_3 — выдержка времени на обдув сварочной ванны защитным газом после сварки.

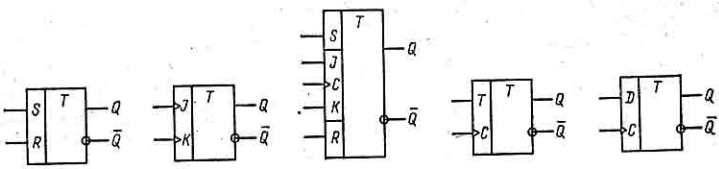


Рис. 2.33. Обозначение триггеров на чертежах

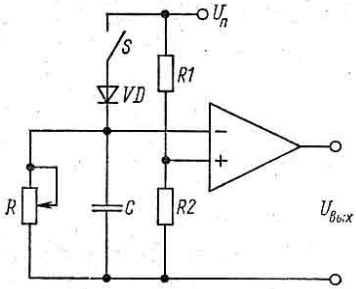


Рис. 2.34. Принципиальная схема задержки времени с компаратором на операционном усилителе

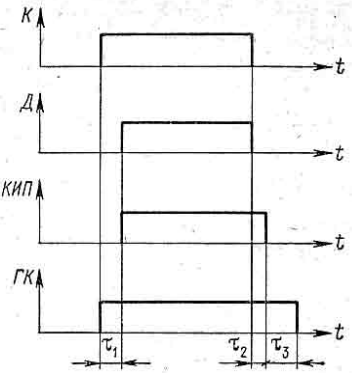


Рис. 2.35. Циклограмма работы блока БУ-01

Функциональная схема блока представлена на рис. 2.36. При нажатии кнопки на горелке сигнал с ее выхода включает через схему ИЛИ газовый клапан *ГК* и запускает выдержку времени τ_1. Кроме того, этот сигнал поступает на вход инвертора НЕ1 и на один из входов схемы совпадения И1. По истечении промежутка времени, отсчитываемого схемой временной задержки, на ее выходе появляется сигнал, который через схему ИЛИ2 запускает привод *Д* и переключает в рабочее состояние запоминающее устройство *ЗУ*, а через схему ИЛИ3 включает контактор источника питания дуги *КИП*. Начинается сварка. По окончании сварки отпускают кнопку *К* на горелке, и сигнал с ее выхода становится равным 0. Это приводит к остановке привода и к появлению

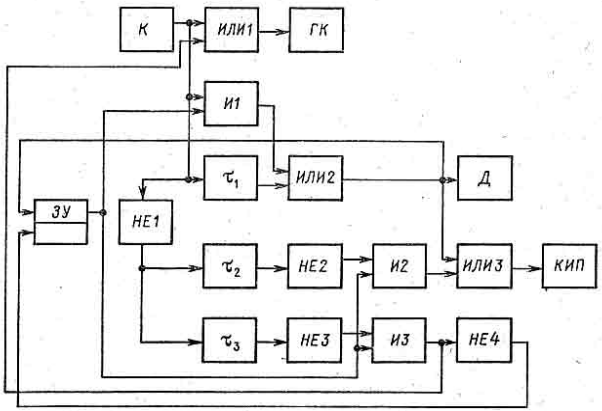


Рис. 2.36. Функциональная схема блока БУ-01

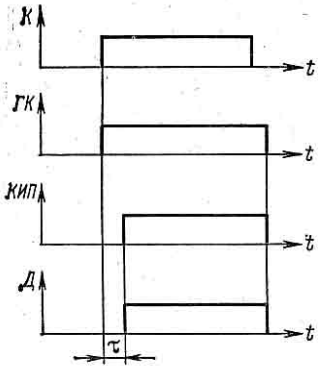


Рис. 2.37. Циклограмма работы полуавтомата, обеспечиваемая блоком БУ-06

сигнала на выходе схемы НЕ1. При этом газовый клапан *ГК* и контактор источника питания *КИП* остаются включенными за счет сигналов, поступающих на схему ИЛИ1 с выхода схемы И3 и на схему ИЛИ3 с выхода схемы И2. Выходные сигналы со схем И2 и И3 обусловлены совпадением по времени сигналов на их входах. На первый вход схемы И2 поступает сигнал с выхода инвертора НЕ2, так как на его входе сигнал до окончания отсчета выдержки времени τ_2 отсутствует. Аналогичным путем поступает сигнал на первый вход схемы И3. На вторые входы схем И2 и И3 сигнал поступает с рабочего выхода запоминающего устройства.

За время отсчета выдержки τ_2 происходит растяжка дуги, а при появлении сигнала на выходе схемы τ_2 пропадает сигнал на выходе схемы И2, что приводит к отключению контактора источника питания *КИП*.

Выдержка времени τ_3 заранее устанавливается больше на значение времени, необходимого для обдува сварочной ванны при остывании после сварки. По истечении этого времени на выходе схемы τ_3 появляется сигнал, отключающий по цепи НЕ3, И3, ИЛИ1 газовый клапан *ГК*, а по цепи НЕ3, И3, НЕ4 возвращающий *ЗУ* в исходное положение.

При работе полуавтомата в режиме коротких швов-прихваток, т. е. в режиме, когда следующий запуск схемы производится при еще не отключенном в предыдущем цикле газовом клапане, новый цикл начинается без отсчета времени τ_1. Это обеспечивается с помощью запоминающего устройства *ЗУ* и схемы И1.

Блок БУ-01 выполнен на базе дискретных полупроводниковых приборов — диодов и транзисторов. Схемы И и ИЛИ построены на диодах, схемы НЕ и *ЗУ* — на транзисторах. Узел управления частотой вращения электродвигателя в силовой части выполнен по двухполупериодной схеме с управляемым мостом. Преобразователь напряжения рассогласования в фазу включающего импульса выполнен на базе *RC*-цепи с пороговым устройством в виде триггера с эмиттерной связью.

Конструкция блока представляет собой металлическое шасси с набором из четырех установленных в нем печатных плат. Кроме того, на шасси блока установлен газовый клапан. На лицевой панели блока имеются два штепсельных разъема для соединения его с пультом дистанционного управления и с подающим механизмом полуавтомата, а также два газовых разъема для включения в тракт защитного газа газового клапана.

Блок предназначен для установки в специальную нишу источника питания дуги. Управление блоком осуществляется с пульта дистанционного управления.

Блок управления сварочными полуавтоматами БУ-06. Блоком БУ-06 комплектуются полуавтоматы ПДГ-305, ПДГ-502, ПДГ-503. Он предназначен для управления

сварочным циклом и частотой вращения электродвигателя привода подачи электродной проволоки. Циклограмма работы полуавтомата, обеспечиваемая блоком БУ-06, представлена на рис. 2.37. Управление блоком осуществляется кнопкой на сварочной горелке от пульта дистанционного управления. Функциональная схема блока БУ-06 приведена на рис. 2.38.

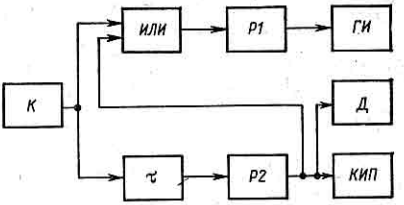


Рис. 2.38. Функциональная схема блока БУ-06

При замыкании кнопки на горелке включается реле *Р1* и своими контактами включает газовый клапан. С выдержкой времени τ на продувку газового тракта срабатывает реле *Р2* и включает привод *Д* подачи электродной проволоки и контактор источника питания *КИП*. Дуга возбуждается непосредственным касанием электродной проволоки изделия, и начинается сварка.

При отпускании кнопки на горелке отпускает реле *Р2*, а затем, с выдержкой времени, и реле *Р1*. Привод останавливается, отключаются контактор источника питания и газовый клапан.

Узел управления сварочным циклом блока БУ-06 выполнен на двух электромагнитных реле. Реле *Р2* срабатывает и отпускает с выдержкой времени. Узел управления частотой вращения электродвигателя выполнен на однопереходном транзисторе с *С*-цепью и биполярных транзисторах. Силовая часть построена по двухполупериодной нереверсивной схеме с управляемым мостом.

Конструктивно блок выполнен на печатной плате с применением объемного монтажа. Внутри блока расположен газовый клапан. На лицевой панели имеются штепсельные разъемы для подключения пульта дистанционного управления и подающего механизма, а также газовые разъемы для включения клапана в газовый тракт.

Блок управления сварочными полуавтоматами БУСП-1. Блок управления сварочными полуавтоматами БУСП-1 предназначен для управления циклом работы и скоростью подачи электродной проволоки в полуавтоматах для сварки в защитном газе длинными швами или точками (электрозаклепками). Он обеспечивает:

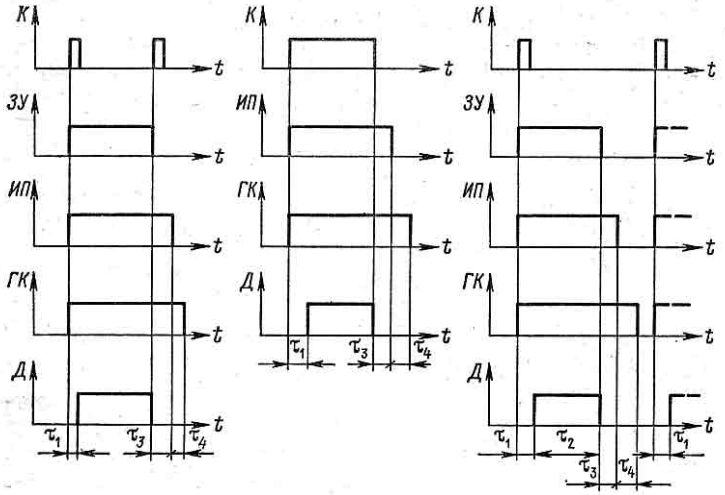


Рис. 2.39. Циклограммы работы блока БУСП-1

ручную установку скорости подачи электродной проволоки и ее автоматическую стабилизацию;

автоматическое включение и выключение исполнительных органов полуавтоматов (привод подачи проволоки, газовый клапан, контактор источника питания дуги);

автоматический отсчет длительности горения дуги при сварке точками;

ручное управление приводом и газовым клапаном при наладке;

динамическое торможение электродвигателя;

защиту электродвигателя от перегрузок.

Управление блоком при сварке осуществляется кнопкой, расположенной на сварочной горелке. При этом для снижения утомляемости сварщика при сварке протяженных швов предусмотрены два режима управления:

режим коротких швов, когда сварочный цикл начинается с момента замыкания кнопки на горелке и заканчивается при ее размыкании. В этом режиме сварщик должен держать кнопку нажатой в течение всего времени сварки;

режим длинных швов, когда сварочный цикл начинается с момента первого замыкания контактов кнопки на горелке и заканчивается при повторном замыкании

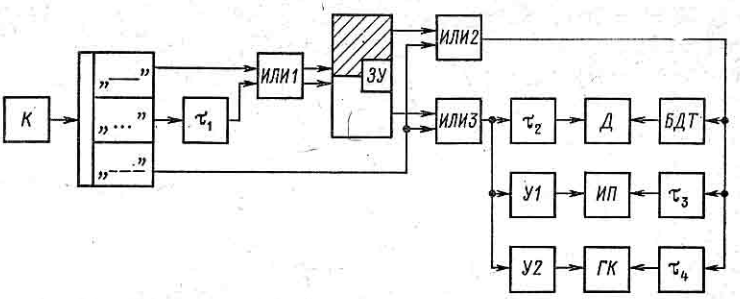


Рис. 2.40. Функциональная схема блока БУСП-1

этих контактов. Это позволяет сварщику при сварке швов значительной протяженности снимать палец с кнопки, что снижает его утомляемость.

Таким образом, возможны три режима работы блока: режим сварки длинных швов, режим сварки коротких швов, режим сварки точками. Выбор режима работы блока осуществляется с помощью переключателей, расположенных на его лицевой панели. Переключатели собраны в блок так, что при включении любого из них два других выключаются.

Циклограммы работы блока в трех названных выше режимах приведены на рис. 2.39. Функциональная схема блока представлена на рис. 2.40.

В момент замыкания контактов кнопки на горелке и при включенном переключателе на режим длинных швов «—» сигнал через схемы ИЛИ1 переключает запоминающее устройство *ЗУ*, выполненное на триггере, в рабочее состояние. На рабочем выходе *ЗУ* появляется сигнал, поступающий на вход схемы ИЛИ3, что приводит к появлению сигнала на ее выходе. Этот сигнал включает через усилитель *У1* контактор источника питания *ИП*, через усилитель *У2* газовый клапан и через элемент, называемый выдержкой времени τ_1, электропривод подачи проволоки. Выдержка времени τ_1 нужна для продувки газового тракта газом перед началом сварки. После запуска привода возбуждается дуга и начинается сварка. Так как запоминающее устройство переключается из одного состояния в другое только в момент замыкания контактов кнопки на сварочной горелке, то схема не меняет своего состояния, если контакты кнопки во время сварки будут замкнуты или разомкнуты.

При повторном замыкании контактов запоминающее устройство переключается в исходное состояние. Сигнал с его нулевого выхода через схему ИЛИ2 останавливает привод подачи проволоки путем снятия напряжения питания с якоря двигателя и запуска блока динамического торможения *БДТ*. С выдержками времени τ_3 на растяжку дуги и τ_4 на обдувку сварочной ванны защитным газом выключаются контактор источника питания и газовый клапан.

При включенном переключателе на режим сварки точками «...» схема работает так же, как при сварке длинных швов. Отличие заключается в том, что время сварки отсчитывается автоматически и запоминающее устройство *ЗУ* переключается в исходное состояние по истечении времени. До тех пор, пока идет отсчет выдержки времени τ_2, любые манипуляции с кнопкой на горелке не меняют состояния схемы.

При включенном переключателе на режим сварки короткими швами «— — —» запоминающее устройство не принимает участия в работе схемы. В момент появления сигнала с кнопки на горелке через схему ИЛИ3 запускаются исполнительные узлы полуавтомата, а в момент пропадания этого сигнала они выключаются в такой же последовательности, как и в первых двух режимах.

Логическая часть блока БУСП-1 выполнена на интегральных микросхемах серии К-511. Для включения контактора источника питания используется электромагнитное реле, а для включения газового клапана — тиристор. Узел управления частотой вращения электродвигателя выполнен на интегральном операционном усилителе и однопереходном транзисторе в качестве порогового устройства. Силовая часть построена по двухполупериодной нереверсивной схеме с одним тиристором.

Блок устанавливается в нишу источника сварочного тока полуавтомата и выполнен на блочных унифицированных конструкциях БУК-Б. На лицевую панель блока выведены переключатели режима работы, задатчик скорости подачи проволоки, кнопка проверки наличия защитного газа, кнопка ручного пуска двигателя.

Системы управления полуавтоматами с питанием от сварочной цепи. В полуавтоматах А-547 и А-1230 питание систем управления осуществляется от сварочной цепи. Это позволило создать компактную и надежную конструк-

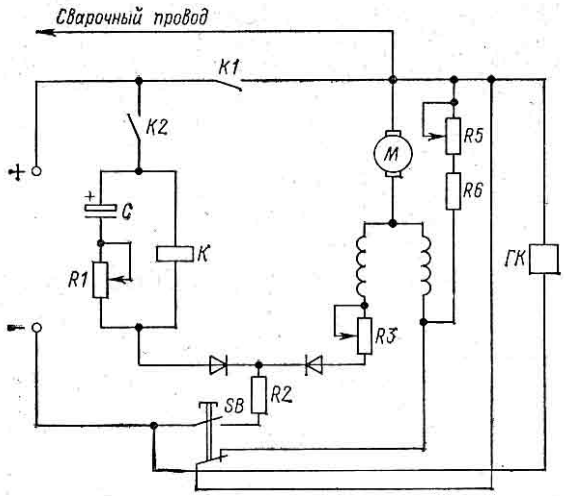


Рис. 2.41. Принципиальная схема системы управления полуавтоматом А-547

цию полуавтоматов и получить при этом удовлетворительные сварочные характеристики.

Основным недостатком рассматриваемых схем является узкий диапазон плавного изменения частоты вращения исполнительных двигателей, поэтому в указанных полуавтоматах предусмотрено плавно-ступенчатое регулирование скорости подачи электродной проволоки (плавное в диапазоне 2 : 1 и ступенчатое путем установки подающих роликов различных диаметров).

Принципиальная схема системы управления полуавтоматом А-547 приведена на рис. 2.41.

Замыканием контакта *K2* производится подготовка схемы к работе. При нажатии на кнопку *SB* замыкается ее замыкающий контакт и подается напряжение на катушку контактора *K*, на двигатель *M* и на газовый клапан *ГК*. Контактор замыкает свой контакт *K1* и подает напряжение источника питания в сварочную цепь. Начинается процесс сварки.

При отпускании кнопки *SB* ее замыкающий контакт размыкается, а размыкающий замыкается и закорачивает якорь двигателя на параллельную обмотку возбуждения, обеспечивая тем самым торможение.

Благодаря конденсатору *C*, подключенному параллельно катушке контактора *K*, последний размыкает свои

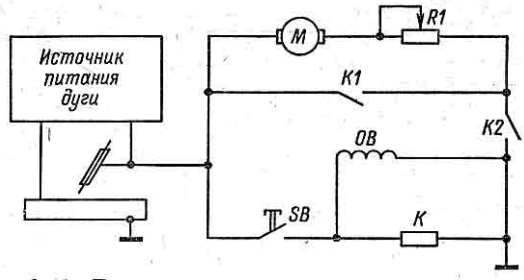


Рис. 2.42. Принципиальная схема полуавтомата А-1230

контакты с выдержкой времени, определяемой параметрами резистора *R1* и конденсатора *C*. Эта выдержка обеспечивает растяжку дуги и газовую защиту при окончании сварки. После размыкания контакта *K1* снимается напряжение со сварочной цепи и закрывается газовый клапан.

Плавное регулирование частоты вращения электродвигателя осуществляется изменением сопротивления резистора *R3* в его якорной цепи.

Схема полуавтомата А-1230 приведена на рис. 2.42.

При замыкании контактов кнопки *SB* напряжение от зажимов источника питания дуги подается на катушку реле *K* и на обмотку возбуждения *OB* двигателя подачи проволоки. Реле *K* размыкает размыкающий контакт *K1* и замыкает замыкающий контакт *K2*, подавая напряжение к якорю двигателя *M*. По окончании сварки кнопка *SB* размыкается, катушка реле *K* обесточивается, размыкается контакт *K2*, снимая напряжение с якоря двигателя, и замыкается контакт *K1*, обеспечивая его динамическое торможение.

Плавное регулирование частоты вращения исполнительного двигателя осуществляется изменением сопротивления переменного резистора *R1*.

Обе рассмотренные схемы представляют собой системы автоматического управления частотой вращения электродвигателя в зависимости от напряжения на дуге.

2.6. ПОДГОТОВКА ПОЛУАВТОМАТОВ И АВТОМАТОВ К РАБОТЕ И УСТРАНЕНИЕ НЕИСПРАВНОСТЕЙ

Подготовка полуавтоматов и автоматов к работе.

1. Все операции надо начинать с подключения заземляющего провода в строгом соответствии с инструкцией, изложенной в паспорте на полуавтомат.

2. При подключении источника сварочного тока к цеховому пускателю напряжения питающей сети необходимо убедиться в соответствии напряжения питающей сети напряжению, указанному на заводской табличке источника.

3. Установить на выпрямителе с помощью переключателя вид жестких внешних характеристик.

4. Установить на блоке управления БУСП-1 необходимый режим работы — «непрерывный», «прерывистый» или «точечный» и вид управления — дистанционный.

5. Диаметр отверстия токоподводящего наконечника горелки установить в соответствии с данными, приведенными на стр. 35, а диаметр направляющего канала — в соответствии с данными табл. 2.2, исходя из заданного диаметра электродной проволоки.

6. При подсоединении горелки к подающему устройству проверить соосность отверстия хвостовика горелки и канавки подающих роликов, учитывая, что смещение их на 1,0 мм уже через несколько минут приводит к прекращению подачи проволоки из-за попадания стружки проволоки в направляющий канал. Хвостовик горелки должен быть максимально приближен к роликам.

7. При намотке проволоки на кассету укладка ее должна быть рядовой. Применение ржавой проволоки недопустимо.

8. При заправке проволоки в направляющий канал горелки с помощью выключателя-кнопки на подающем устройстве установить необходимое давление роликов на проволоку, чтобы она подавалась равномерно, без пробуксовки. При несоосности токоподводящего наконечника и свечи или плохой зенковке наконечника проволока может «утыкаться» в него и возможна либо пробуксовка роликов, либо их остановка в случае чрезмерного давления на проволоку. При этом необходимо либо заменить наконечник, либо сначала пропустить проволоку в неввинченный наконечник, а затем ввернуть его в свечу. В последнем случае возрастает усилие проталкивания проволоки.

Неисправности и их устранение. Наиболее вероятные неисправности при условии правильной подготовки полуавтомата к эксплуатации и способы их устранения приведены в табл. 2.6.

Современные схемы управления сварочным оборудованием достаточно сложны. Они строятся на транзисто-

Таблица 2.6

Неисправность	Дополнительный признак	Возможная причина	Способ устранения неисправности
Не включается источник сварочного тока	При местном управлении источник включается, при дистанционном не включается	В блоке БУСП-1 вышел из строя транзистор *VT3* или реле *K1*	Заменить транзистор *VT3* или реле *K1*
Электродная проволока не подается	Двигатель подающего механизма не вращается	Перегрузка по току, срабатывает токовая защита	Устранить резкие изгибы проволоки, закусывание в кассете или заклинивание в редукторе
		Нет импульсов управления в блоке БУСП-1	Проверить и при необходимости устранить неисправности в цепи задающего резистора *R6*, усилителя *A1* или транзисторов *VT1* и *VT2*
Неустойчиво работает двигатель подачи электродной проволоки	Искрение на коллекторе	Плохой контакт щеток с коллектором	Очистить от угольной пыли щеткодержатели или заменить щетки
Не включается клапан защитного газа	Напряжение к клапану подводится	Неисправна катушка клапана	Заменить катушку или весь клапан
	Напряжение к клапану не подводится	В блоке БУСП-1 вышел из строя тиристор *VS20* или транзистор *VT4*	Заменить неисправный элемент
Большой вылет электродной проволоки после прекращения сварки	—	В блоке БУСП-1 неисправна схема динамического торможения двигателя	Устранить обрыв или заменить тиристор *VS12*

рах, тиристорах, интегральных микросхемах. Их алгоритм работы также сложен. Поэтому понимание обслуживающим персоналом основ микроэлектроники является непременным условием бесперебойной работы современного электросварочного оборудования.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

СПЕЦИАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

3.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

К специальному оборудованию относится оборудование для сварки конкретных изделий или ряда однотипных изделий. Каждая специальная установка предназначена для замены ручной дуговой сварки на механизированную с большей или меньшей степенью автоматизации.

Механизация и автоматизация сварочного процесса должны начинаться с соответствующей проработки самого свариваемого изделия, заключающейся в обеспечении необходимой точности изготовления изделия, выборе технологии его изготовления и в некоторых случаях в изменении конструкции изделия. Кроме того, необходимо определить оптимальную конфигурацию и взаимное расположение швов, ибо слишком часто при проектировании изделий совершенно не учитывается требование автоматизации сварочных операций. Без выполнения указанных условий бывает трудно, а иногда и невозможно добиться стабильной работы установки и получения качественных швов.

Классифицировать установки можно по конфигурации шва, по способу сварки, по способу защиты сварочной ванны и т. д. Но все специальные установки по конструктивному исполнению можно разделить на два типа:

I — установки с перемещением сварочной горелки по стыку;

II — установки с перемещением изделия относительно горелки.

Выбор типа установки при проектировании определяется массой и габаритами изделия, положением, в котором должна производиться сварка, конфигурацией шва.

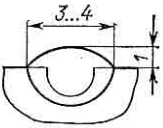
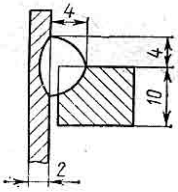
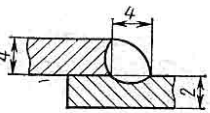
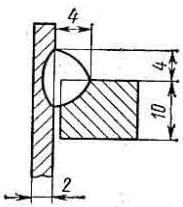
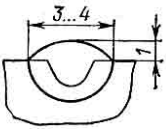
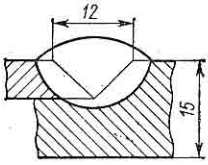
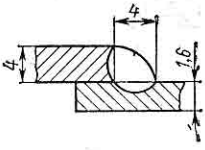
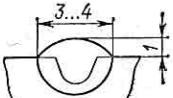
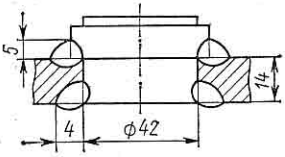
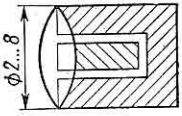
Тип установки	Вид сварного соединения		Сварочный ток (горелка), А	Способ защиты зоны дуги
УДГ-103		Сварка полюсов электрических машин. Толщина пластины 2 мм. Толщина полюса 230 мм. Четыре шва	180	CO_2
УДГ-308		Кольцевой шов диаметром 50 мм	110—130	
УДГ-309		Два кольцевых шва диаметром 50—70 мм		
УДГ-310		Кольцевой шов диаметром 50—70 мм		
УДГ-311		Сварка пакета железа сварочных трансформаторов. Четыре шва. Толщина пластины 0,35 мм. Толщина пакета 108—150 мм	120—130	

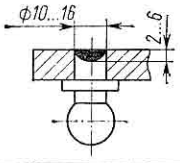
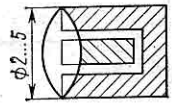
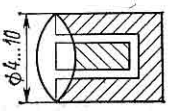
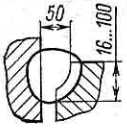
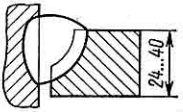
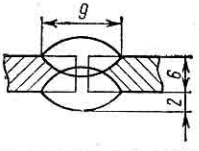
Таблица 3.1

Материал электрода	Диаметр электрода, мм	Свариваемый материал, мм	Производительность, изд/ч, не менее	Число горелок, шт.	Габариты, $L \times S \times H$, мм	Тип источника сварочного тока	Примечание
Св-08Г2С	1,0—1,2	Электротехническая сталь $s = 2$ мм	60	4	3300× ×2500× ×2200	ВДГ-302	—
	1,2	Сталь	25	1	1630× ×1200× ×2000		
			20	2	2675× ×1200× ×2000		
			30		3400× ×1600× ×2250		Габариты без источника сварочного тока
	1,0—1,2	Электротехническая сталь $s = 0,35$ мм	15	4	3920× ×1320× ×2000		

Тип установки	Вид сварочного соединения		Сварочный ток (горелка), А	Способ защиты зоны дуги
УДГ-312		Сварка многопроходная. Два кольцевых шва	220	
УДГ-312-1		Два кольцевых шва диаметром 100 мм	140—160	CO_2
УДГ-313		Сварка пакета статора. Толщина пластины 0,35—0,5 мм. Четыре шва. Толщина пакета 150 мм	180	
УДГ-314		Приварка шкворней к шаровой опоре. Четыре кольцевых шва	220	
УДГ-508		Сварка коллектора и обмоток в якорях электрических машин	250—400	Ar+ +He

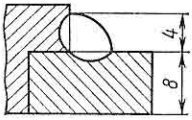
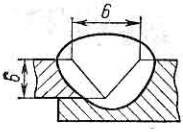
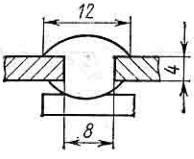
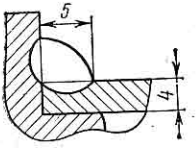
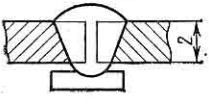
Продолжение табл. 3.1

Материал электрода	Диаметр электрода, мм	Свариваемый материал, мм	Производительность, изд/ч, не менее	Число горелок, шт.	Габариты, $L \times S \times H$, мм	Тип источника сварочного тока	Примечание
Св-08Г2С	1,2	Сталь	10	2	2735× ×1365× ×2008	ВДГ-302	Габариты без источника сварочного тока
			30				
	1,0—1,2	Электротехническая сталь $s = 0{,}35 \ldots 0{,}5$ мм	20	4	2100× ×1900× ×2200		
	1,2	Сталь	40	2	2735× ×1365× ×2008		
Вольфрам	3,0—6,0	Медь	2—4		4000× ×1500× ×2500	ВДУ-504	Наибольший коллектор диаметром 630 мм

Тип установки	Вид сварочного соединения		Сварочный ток (горелка), А	Способ защиты зоны дуги
УДГ-509		Приварка пальцев к рычагам трактора К-701. Сварка электрозаклепками	180—450	CO_2
УДГ-510		Сварка коллектора и обмоток в якорях электрических машин	120—400	Ar + He
УДГ-511			250—420	
УДГ-512		Четыре многопроходных шва	500	CO_2
УДГ-513		Многопроходной шов		
УДГ-514		Два кольцевых шва диаметром 500 мм	300	

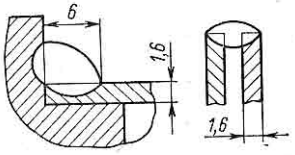
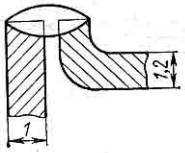
Продолжение табл. 3.1

Материал электрода	Диаметр электрода, мм	Свариваемый материал, мм	Производительность, изд/ч, не менее	Число горелок, шт.	Габариты, $L \times S \times H$, мм	Тип источника сварочного тока	Примечание
Св-08Г2С	1,2—1,6	Сталь	150	1	1200× ×1400× ×1700	ВДУ-504	—
Вольфрам	2,0—4,0	Медь	4—20	1	1900× ×3400× ×1100		Наибольший коллектор диаметром 200 мм
	3,0—6,0		1—2	2	2384× ×5000× ×2025		Наибольший коллектор диаметром 1000 мм
Св-08Г2С	2,0	Сталь	0,3	2	3500× ×3500× ×4500		Габариты без источника сварочного тока
			0,5	1			
	1,4		6	4	2000× ×1600× ×2340		—

Тип установки	Вид сварного соединения		Сварочный ток (горелка), А	Способ защиты зоны дуги
УДГ-515		Кольцевой шов диаметром 40 мм	200	CO_2
ПДГ-506		Два кольцевых шва диаметром 50—100 мм	150—270	
УДФ-501		Немагнитный шов длиной 500 мм	360	Флюс
УДГ-315		Кольцевой шов диаметром 300 мм	200	Ar
УДГ-316		Шов длиной 1800 мм		

Продолжение табл. 3.1

Материал электрода	Диаметр электрода, мм	Свариваемый материал, мм	Производительность, изд/ч, не менее	Число горелок, шт.	Габариты, $L \times S \times H$, мм	Тип источника сварочного тока	Примечание
Св-08Г2С	1,2	Сталь	60	1	1200× ×1000× ×2000	ВДУ-504	—
	1,2—1,6		80	2	4500× ×1450× ×1945		
Медь	2,0		25	1	1250× ×900× ×1800		Габариты без источника сварочного тока
Алюминий	1,6—2,0	Алюминиевый сплав	15		2200× ×1100× ×1400	УДГ-301	—
			3		4600× ×1100× ×1900		

Тип установки	Вид сварного соединения		Сварочный ток (горелка), А	Способ защиты зоны дуги
УДГ-506		Два кольцевых шва диаметром 50 и 300 мм	250 и 500	CO_2
АДА-500-2		Два шва по прямоугольному периметру: приварка дна и крышки корпуса аккумулятора	125	

В большинстве случаев обеспечить стабильность процесса сварки легче в установках II типа, так как сварка происходит всегда в одном и том же пространственном положении. Однако в некоторых случаях перемещение изделия в процессе сварки либо принципиально невозможно, например при монтажно-сварочных работах на нефтегазопроводах, либо конструктивно нецелесообразно, например при значительных габаритах изделия или при сложной конфигурации шва. Кроме того, перемещение изделия в процессе сварки часто позволяет использовать для установки стандартные манипуляторы, вращатели и другие механизмы, выпускаемые серийно.

В специальном оборудовании могут быть использованы различные способы сварки плавлением: сварка плавящимся электродом в среде защитных газов, сварка плавящимся электродом под флюсом, сварка неплавящимся электродом, импульсно-дуговая сварка и др. Однако, когда это возможно, желательно не применять сварку под слоем флюса, ибо необходимость подачи и уборки

Прддолжение табл. 3.1

Материал электрода	Диаметр электрода, мм	Свариваемый материал, мм	Производительность, изд/ч, не менее	Число горелок, шт.	Габариты, $L \times S \times H$, мм	Тип источника сварочного тока	Примечание
Св-08Г2С	1,2—1,6	Сталь	70	3	2600× ×3400× ×2500	ИДГМ 1001/1601	Габариты без источника сварочного тока
Вольфрам	3,0—4,0		120	4	2840× ×1210× ×1680	ВДГ-601	—

флюса, а также защиты механизмов от попадания флюса значительно усложняет оборудование, снижает его надежность.

Краткие технические данные специального оборудования для дуговой сварки приведены в табл. 3.1.

3.2. КОНСТРУКЦИИ УЗЛОВ

В конструкции каждой специальной установки можно, как правило, выделить основные функциональные узлы. Ниже определены требования к этим узлам и даны примеры конструктивных решений некоторых из них.

Сборочно-зажимное приспособление. Сборочно-зажимное приспособление должно выполнять следующие операции:

собрать изделие под сварку, обеспечив строго определенное взаимное положение его составных частей;

зажать изделие, исключив при этом возможность каких-либо перемещений его составных частей относительно друг друга;

обеспечить надежный подвод сварочного тока к изделию;

в установках II типа обеспечить плавное и равномерное перемещение изделия во время сварки;

после окончания сварки освободить сваренное изделие и в случае необходимости вывести его за пределы установки, затем вернуться в исходное положение.

При поступлении к установке предварительно собранного на прихватках изделия за сборочно-зажимным приспособлением остается выполнение всех тех же операций, за исключением сборки.

Очень важным обстоятельством для нормальной работы сборочно-зажимного приспособления является отсутствие или, в крайнем случае, сведение до минимума люфтов во всех звеньях приспособления. При наличии люфтов во время перемещения изделия, т. е. во время сварки, из-за смещения центра тяжести нарушается равномерность движения, появляются рывки, которые отрицательно сказываются на качестве шва. Отсутствие люфтов достигается качественным изготовлением узлов, применением безлюфтовых передач, соответствующими допусками и посадками в сопрягаемых деталях и иногда применением тормозных устройств.

Сборочно-зажимное приспособление установки для сварки кольцевых швов в изделии, состоящем из двух деталей, может представлять собой две бабки — заднюю и переднюю. В патрон каждой из бабок закладывается соответствующая деталь.

На рис. 3.1 показан пример конструкции передней бабки. В сварном корпусе *7* помещается червячно-цилиндрический редуктор, состоящий из червяка *3*, червячного колеса *1* и цилиндрических зубчатых колес *2* и *5*. Через полый вал *6* зубчатого колеса *5* проходит шток *8* цилиндра *4*. На свободный конец штока *8* посажен патрон *9*. Шток *8* имеет возможность перемещаться поступательно при подаче воздуха в цилиндр *4*. Это необходимо для зажатия свариваемого изделия. Кроме того, шток *8* вращается вместе с зубчатым колесом *5* в процессе сварки, что обеспечивает получение кольцевого шва. На валу *6* закреплено медное кольцо *10*, соединенное токопроводом *14* с патроном *9*. Ток к медному кольцу *10* поступает через щетку *11*, расположенную в щеткодержателе *12*. К корпусу редуктора *7* прикреплен приводной электродвигатель *13* постоянного тока.

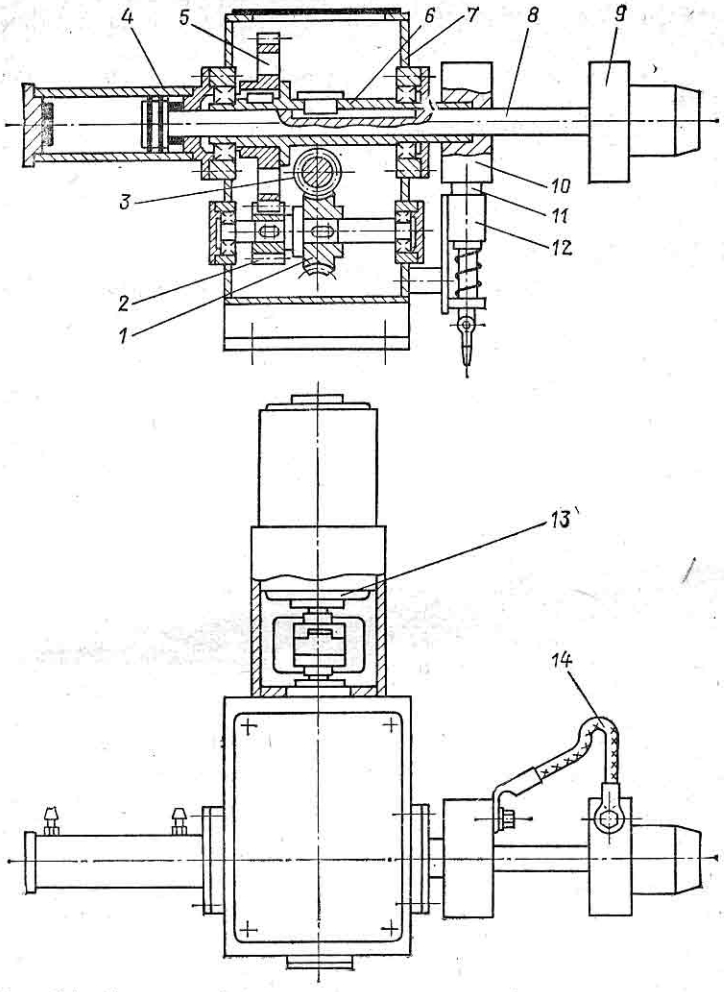


Рис. 3.1. Передняя бабка зажимного приспособления установки для сварки кольцевых швов

Конструкции сборочно-зажимных приспособлений из всех основных функциональных узлов в наибольшей степени определяются конфигурацией свариваемого изделия и поэтому труднее всего поддаются унификации. Однако отдельные элементы этих приспособлений могут быть унифицированы для швов сходной формы.

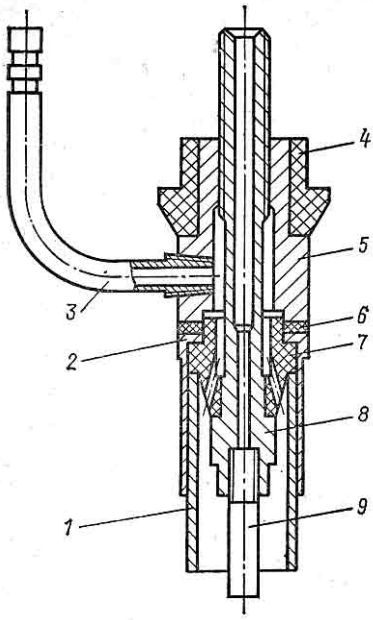


Рис. 3.2. Горелка для сварки плавящимся электродом с центральной подачей газа, без водяного охлаждения

Сварочная головка. В сварочную головку для сварки плавящимся электродом в общем случае входят: горелка, механизм подачи проволоки, механизм перемещения головки, механизм колебаний электродов, механизм слежения за стыком, суппорты для корректировки положения горелки (электрода), газовая или флюсовая аппаратура, кассета с электродной проволокой.

В зависимости от назначения оборудования в сварочной головке могут отсутствовать некоторые из перечисленных узлов или могут быть добавлены другие необходимые узлы.

В специальном оборудовании используются такие же механизмы подачи проволоки, газовая аппаратура, кассеты с электродной проволокой, как и в оборудовании общего применения для дуговой сварки (полуавтоматы типов ПДГ-305, ПДГ-502 и др.). Основным исполнительным органом в сварочной головке является горелка. Горелки для сварки в защитных газах могут иметь центральный (концентричный) и боковой подвод газа. В первом случае газовое сопло представляет собой часть горелки, а во втором — отдельный патрубок, располагаемый сбоку от горелки.

Горелки с центральным подводом газа в целом аналогичны горелкам для полуавтоматической сварки, но отличаются от них формой корпуса и иногда несколько бо́льшими размерами. Они применяются обычно для сварки швов во всех пространственных положениях, в том числе в труднодоступных местах. Недостатком таких горелок является сильное забрызгивание сопловой части, что требует частой чистки сопла.

Горелки с боковой подачей защитного газа используются преимущественно для сварки прямолинейных про-

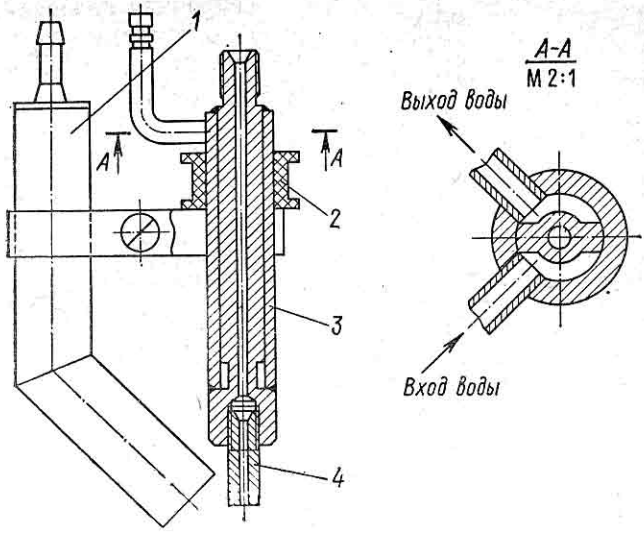


Рис. 3.3. Горелка для сварки плавящимся электродом с боковой подачей газа и водяным охлаждением

тяженных швов, не ограниченных в пространстве. Возможна также сварка кольцевых швов. При боковой подаче защитного газа забрызгивание сопла минимальное.

Обычно горелки для автоматической сварки током свыше 250 А имеют водяное охлаждение рабочей части. Это значительно уменьшает налипание брызг металла на рабочую часть горелки, что сокращает простои, связанные с очисткой и заменой элементов горелки;

На рис. 3.2 показана горелка для сварки плавящимся электродом в среде защитных газов. Горелка с центральной подачей газа, без водяного охлаждения. В корпус *5* ввернуты свеча *8* и трубка *3* для подвода защитного газа. Изоляционная шайба *6* и изоляционная втулка *7* служат для изоляции цанги *2* и сопла *1*. В изоляционной втулке *7* имеются отверстия для прохода защитного газа. Наконечник *9* вворачивается в свечу *8*. Втулка *4* служит для крепления горелки.

На рис. 3.3 показана другая конструкция горелки для сварки плавящимся электродом в среде защитных газов. Горелка имеет боковую подачу защитного газа и водяное охлаждение и состоит из паяного медного корпуса *3*, изоляционной втулки *2* для крепления горелки, газопод-

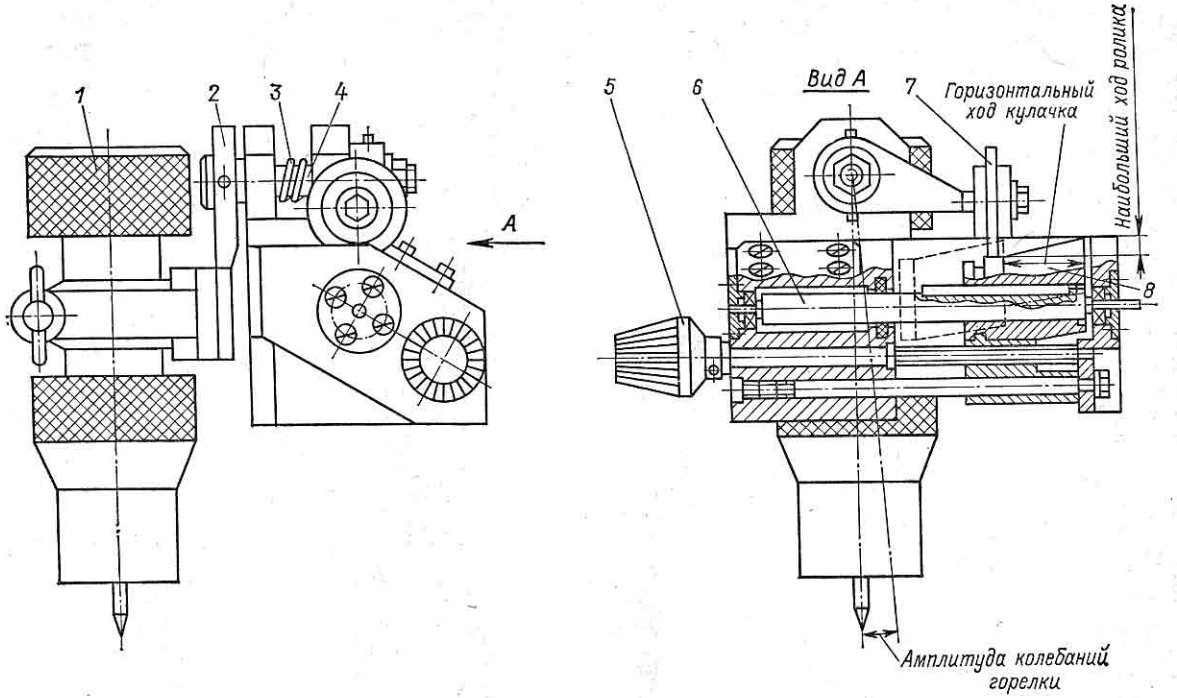


Рис. 3.4. Механизм колебаний электрода с ручным регулированием амплитуды колебаний

вода *1* и наконечника *4*. Газоподвод *1* имеет возможность установочных перемещений относительно наконечника *4*.

Очень часто для обеспечения необходимой технологии сварки изделия требуется колебать электрод. Существует множество конструкций механизма колебаний электрода. На рис. 3.4 показана одна из таких конструкций. На приводном валу *6* закреплен кулачок *8* необходимого профиля, который имеет возможность перемещаться вдоль оси вала *6*. К кулачку *8* пружиной *3* постоянно прижат ролик *7*. Ролик *7* жестко закреплен на оси *4*, на которой через рычаг *2* крепится горелка *1*. При вращении вала *6* ось *4* совершает колебательные движения, соответственно колеблется горелка *1*. Амплитуда колебаний определяется относительным положением кулачка *8* и ролика *7* и регулируется винтом *5*, который перемещает кулачок *8* вдоль вала *6*.

Однако приведенная конструкция позволяет регулировать амплитуду колебаний только вручную, что крайне неудобно при автоматической многопроходной сварке, где при переходе от прохода к проходу необходимо изменять амплитуду колебаний. Кроме того, в этой конструкции электрод после прекращения колебаний может остановиться в любой произвольной точке своей траектории, что во многих случаях, например в сварочных роботах и некоторых специальных установках, совершенно неприемлемо.

На рис. 3.5 показан механизм колебаний электрода, который позволяет автоматически изменять амплитуду колебаний по заданной программе в процессе сварки, а после прекращения колебаний автоматически устанавливает электрод строго по продольной оси шва. Механизм состоит из основания *3*, с помощью которого производится крепление механизма. На основании *3* закреплены пневмоцилиндр *10*, обеспечивающий автоматическое изменение амплитуды колебаний и фиксацию оси сварочной горелки *22* в среднем положении, и проушина *2*, относительно которой совершает поперечные колебания держатель *21* со сварочной горелкой *22*.

В расточке подвижного кронштейна *13* закреплены электродвигатель *6* и планетарный редуктор *12*, на оси которого закреплен эксцентрик *15* с установочным участком в виде кольца, соосного с осью редуктора. Подвижный кронштейн связан со штоком пневмоцилиндра *10* и может перемещаться вдоль направляющей *9*, закреплен-

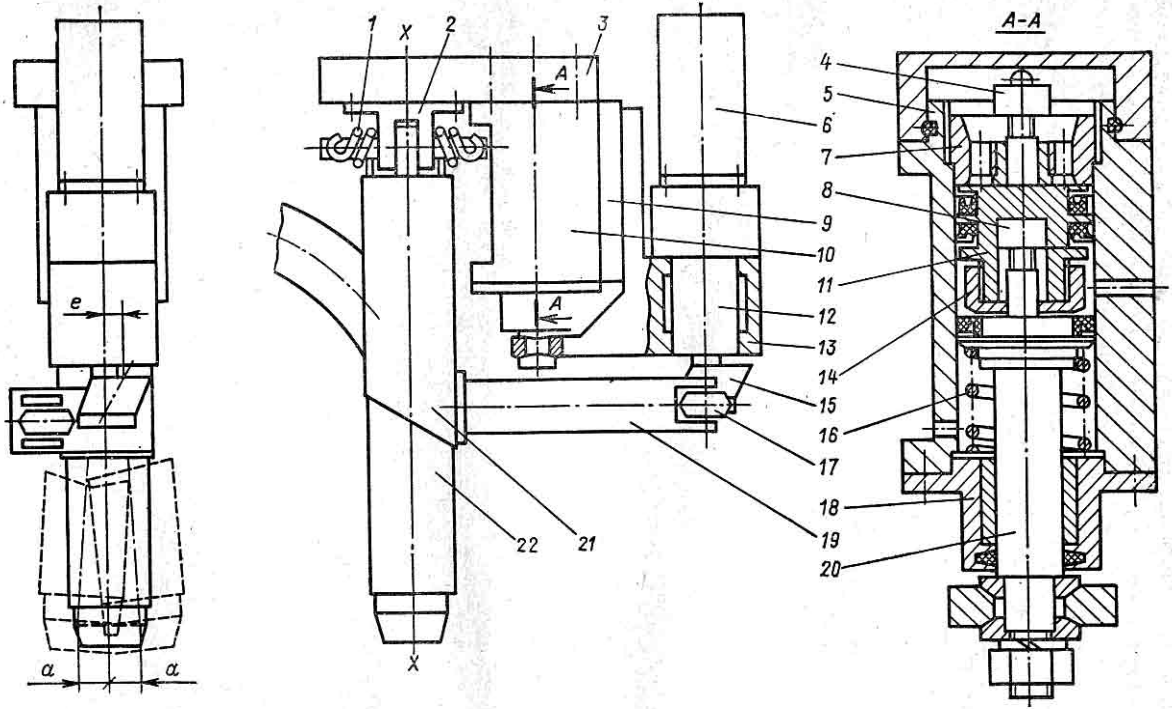


Рис. 3.5. Механизм колебаний электрода с автоматическим регулированием амплитуды колебаний

ной на его корпусе. К эксцентрику *15* постоянно прижат ролик *17*, закрепленный на тяге *19*, жестко связанной с держателем *21* сварочной горелки *22*. Поджатие ролика *17* осуществляется пружинами кручения *1*, закрепленными на оси качания держателя.

Пневмоцилиндр *10* состоит из призматического корпуса *5*, в который ввернута диафрагма *7*, взаимодействующая с регулируемым упором *4* бесштокового поршня *11*. Поршень *11*, в свою очередь, взаимодействует с аналогичным упором *8* штокового поршня *20* через накидную гайку *14*. Центрирование штокового поршня *20* осуществляется втулкой *18*, крепящейся к корпусу *5* пневмоцилиндра *10*. Пружина *16* обеспечивает возврат подвижной системы поршней *11* и *20* пневмоцилиндра *10* в исходное положение после отключения каналов пневмоуправления.

Механизм колебаний работает следующим образом. В исходном положении сжатый воздух в пневмоцилиндр *10* не поступает и электродвигатель *6* выключен. Пружина *16* пневмоцилиндра *10* через кронштейн *13* перемещает эксцентрик *15* (вместе с электродвигателем *6* и редуктором *12*) таким образом, что ролик *17* оказывается на установочном участке эксцентрика *15*. Вследствие этого ось сварочной горелки *22* (ось электрода) совпадает с продольной осью шва. После включения электродвигателя *6* сжатый воздух подается либо в верхнюю полость пневмоцилиндра *10*, либо в нижнюю, либо в обе полости сразу. Соответственно эксцентрик *15* перемещается относительно ролика *17* либо на величину хода поршня *11*, либо на величину хода поршня *20*, либо на величину суммы ходов поршней *11* и *20*. Величины этих ходов заранее устанавливаются упорами *4* и *8*.

Каждому из перечисленных положений соответствует свой эксцентриситет *e*. Вращение эксцентрика *15* через ролик *17* и тягу *19* заставляет колебаться вокруг оси *X—X* держатель *21* и сварочную горелку *22*. Амплитуда колебаний *a* прямо пропорциональна эксцентриситету *e*, который, как уже было указано, определяется взаимным положением ролика *17* и эксцентрика *15*.

В некоторых случаях сварочная головка может быть закреплена на стандартной колонне.

Кроме сборочно-зажимного приспособления и сварочной головки, в специальной установке можно выделить еще такие основные функциональные узлы, как источник

питания и электрическое устройство. Источники питания сварочной дуги выбираются, как правило, из серийно изготовляемых промышленностью. Тип источника питания определяется необходимыми параметрами сварки. Электрическое устройство установки обеспечивает необходимые электрические параметры сварочного процесса и работу механизмов в автоматическом и наладочном режимах.

3.3. КОНСТРУКЦИИ И ТИПЫ УСТАНОВОК

Ниже дается описание конструкции и принципа действия некоторых из специальных установок, указанных в табл. 3.1.

Четырехпозиционная установка УДГ-514, схема которой показана на рис. 3.6, предназначена для сварки плавящимся электродом в среде углекислого газа одновременно четырех кольцевых швов (двух внутренних и двух наружных). Установка состоит из станины *1*, четырех бабок *2*, размещенных на поворотном столе *3*, четырех сварочных горелок *4*, четырех подающих механизмов *5*, четырех кассет со сварочной проволокой *6* и электрического устройства *7*. Вращение поворотного стола происходит под углом 45° к горизонтальной плоскости, что позволяет при вертикальном расположении горелок создать наиболее благоприятные условия формирования шва. На плоскости стола под углом 90° относительно друг друга расположены четыре бабки *2*. Каждая бабка имеет зажимное устройство для установки и крепления изделия и электромеханический привод для вращения изделия. Сварочные горелки *4* имеют пневматический привод для перемещения их из исходного положения в рабочее и обратно. На позиции *I* осуществляется загрузка заготовки и съем сваренного изделия, на позициях *II*, *III* и *IV* производится сварка.

Работает установка следующим образом. На позиции *I* оператор производит загрузку и крепление очередной заготовки. Нажатием кнопки «Пуск» дается команда на поворот стола *3* на 90° и его фиксацию в этом положении. При включении конечного выключателя, расположенного на поворотном столе, горелки *4* перемещаются из исходного положения в рабочее, и дается команда на подачу электродной проволоки, подачу защитного газа, вращение бабок *2* на позициях *II*, *III* и *IV* и включение источников

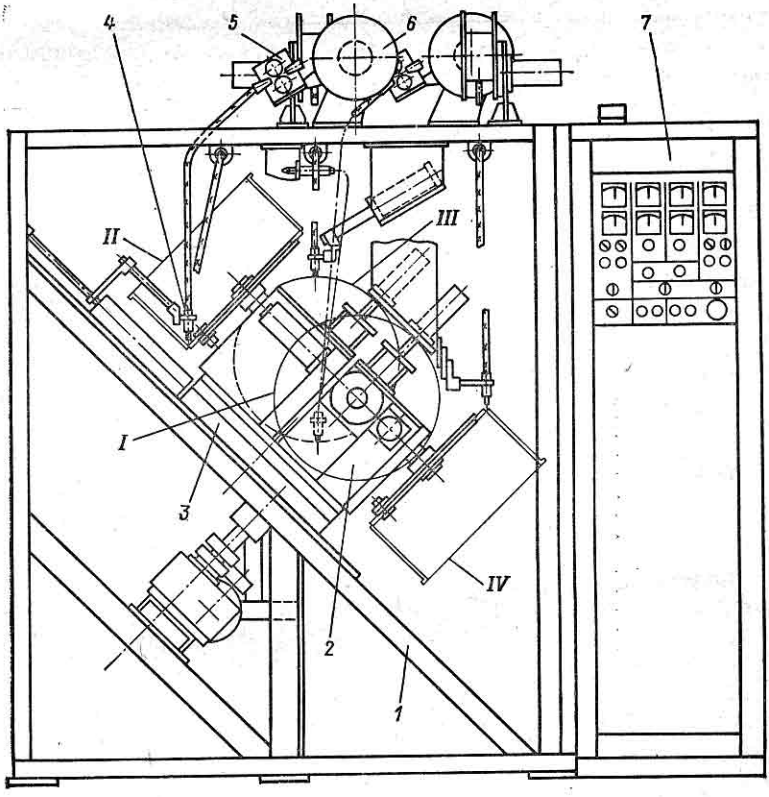


Рис. 3.6. Установка типа УДГ-514

питания. На позиции *II* производится сварка первого внутреннего шва, на позиции *III* — первого наружного и второго внутреннего швов, на позиции *IV* — второго наружного шва. В то время как на позициях *II*, *III* и *IV* производится сварка, оператор на позиции *I* снимает сваренное изделие и устанавливает следующую заготовку. На позициях *II*, *III* и *IV* после поворота изделия на 365—370°, что обеспечивает перекрытие шва, от конечных выключателей, расположенных на бабках *2*, дается команда на прекращение подачи сварочной проволоки и защитного газа, выключение источников питания и перемещение горелок в исходное положение. Установка готова к повторению цикла. Контроль за режимом сварки

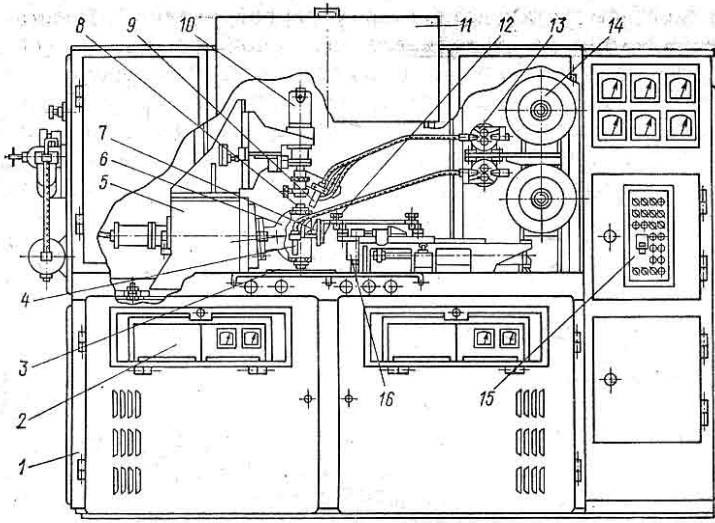


Рис. 3.7. Установка типа УДГ-314

осуществляется приборами, расположенными на электрическом устройстве 7.

В электромашиностроении широко применяются сварные полюсы. Для высокопроизводительной сварки полюсов электрических машин разработана четырехпозиционная установка типа УДГ-103. Сварка производится одновременно четырьмя сварочными горелками в среде углекислого газа в вертикальном положении. Установка состоит из поворотного стола, двух пневматических прижимных устройств для формирования полюса, двух сварочных головок. Сварочные головки установлены на направляющих, прикрепленных к неподвижным стойкам. На стойках расположены кассеты со сварочной проволокой и электромеханический привод для перемещения сварочных головок. Перемещение головок осуществляется ходовыми винтами. Каждая сварочная головка состоит из двух подающих механизмов и двух сварочных горелок, закрепленных на основании через специальные кронштейны.

Листы полюсного железа собираются в специальной оправке, которая фиксируется в гнезде на поворотном столе. После нажатия оператором кнопки «Пуск» поворотный стол поворачивается на 90°, и оправка с полюс-

ным железом устанавливается у первой стойки. Пневматический прижим сдавливает полюсное железо с необходимым усилием, после чего автоматически включаются подающие механизмы, источники питания, клапаны подачи защитного газа и привод, обеспечивающий перемещение сварочной головки. Каждый полюс сваривается четырьмя швами: два шва варятся у первой стойки, два других шва — у второй. Сварка ведется сверху вниз, начало и конец сварки — на выходных планках. В то время как у первой и второй стоек происходит сварка, на одной из свободных позиций производится замена сваренного полюса на оправку с полюсным железом под сварку.

Установка УДГ-314 для приварки шкворней к шаровой опоре показана на рис. 3.7. Сварка ведется плавящимся электродом в среде углекислого газа. Установка состоит из станины *1*, бабки *5*, верхней горелки *9*, нижней горелки *4*, привода вращения верхней горелки *10*, привода вращения нижней горелки *16*, двух подающих механизмов *13*, двух кассет для электродной проволоки *14*, электрического устройства *15* и двух источников питания *2* типа ВДГ-302.

Каждый из шкворней *8* необходимо приварить к шаровой опоре *6* двумя швами — одним снаружи, другим — изнутри. Шаровая опора *6* с запрессованными в нее шкворнями *8* вручную закрепляется в зажимном устройстве бабки *5*. При нажатии кнопки «Пуск» щит *11* опускается вниз, защищая оператора от светового излучения и газов; горелки *9* и *4* пневматическими цилиндрами устанавливаются в рабочее положение (горелка *9* опускается вниз, горелка *4* сдвигается в шаровую опору). Автоматически включаются подача защитного газа, подача сварочной проволоки, источники питания и приводы *10* и *16* вращения горелок. Ось привода *10* является продолжением оси шкворня *8*, и горелка *9*, смещенная относительно указанных осей, описывает окружность необходимого диаметра. Горелка *4* крепится на кронштейне *7*, который, в свою очередь, установлен в двух эксцентриковых опорах *12*, что обеспечивает вращательное движение горелки в горизонтальной плоскости. Диаметр окружности вращения горелки устанавливается регулированием эксцентриковых опор *12*.

Горелка *9* сваривает наружный шов, горелка *4* — внутренний. После окончания сварки первым швом го-

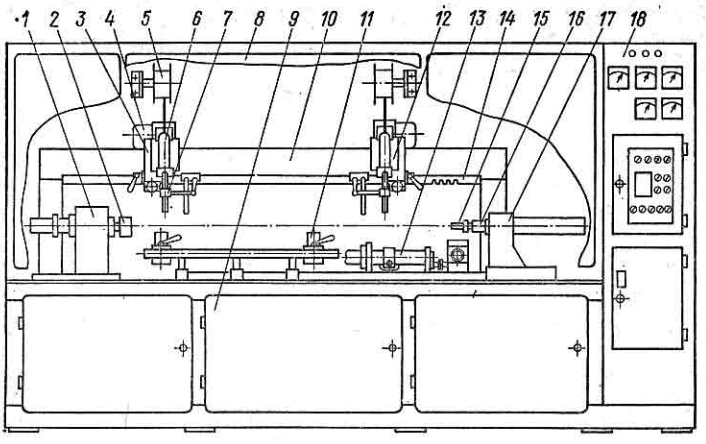


Рис. 3.8. Установка типа ПДГ-506

релки автоматически отводятся в исходное положение, и конечным выключателем дается команда на вращение зажимного устройства, расположенного на бабке *5*. Зажимное устройство поворачивается на 180°, меняя шкворни местами; горелки *9* и *4* вновь выдвигаются в рабочее положение, и происходит сварка каждого из шкворней вторым швом. Во избежание закручивания подходящих к горелкам шлангов, вращение горелок при первой и второй сварках осуществляется в разные стороны. По окончании сварки вторым швом изделие опускается на транспортирующее устройство *3*, которое выводит изделие за пределы установки. В то же время щит *11* поднимается и для сварки устанавливается следующее изделие.

На рис. 3.8 показана конструктивная схема установки ПДГ-506, предназначенной для сварки плавящимся электродом в среде углекислого газа двух кольцевых швов одновременно. Установка состоит из станины *9*, передней бабки *1*, задней бабки *17*, сварочных головок *3* и *12*, поддерживающих призм *11*, транспортирующего устройства *13* и электрического устройства *18*.

Каждая из сварочных головок *3* и *12* включает в себя механизм подачи электродной проволоки *4*, пневматический цилиндр *6* для опускания и подъема сварочной горелки *7*, кассету *5* для электродной проволоки, а также механизмы для корректировки положения сварочной горелки. Каждая сварочная головка может перемещаться

влево и вправо вдоль стойки *10*. Перемещение настроечное и производится вручную. К стойке *10* прикреплена зубчатая рейка *14* для точной установки каждой из сварочных головок в нужное положение.

Собранное изделие устанавливается на поддерживающие призмы *11*, и левый конец изделия вручную заводится в патрон *2* передней бабки *1*. После нажатия кнопки «Пуск» опускается пневматическим цилиндром щит *8* и выдвигается влево шток *16* задней бабки *17*. На штоке *16* имеется коническая насадка *15*, которая входит во внутреннее отверстие изделия, приподнимая его над поддерживающими призмами. Изделие сдавливается в осевом направлении, и одновременно ось изделия совмещается с осью передней и задней бабок. Автоматически опускаются сварочные горелки *7*, включаются источники питания, подача сварочной проволоки, подача защитного газа, вращение передней бабки *1*. Сварка осуществляется с перекрытием шва на 10—15 мм. После окончания сварки сварочные горелки поднимаются, патрон *2* отходит влево, а шток *16* — вправо и изделие опускается на поддерживающие призмы *11*. Призмы *11*, в свою очередь, опускаются пневматическим цилиндром, и сваренное изделие оказывается на транспортирующем устройстве *13*, которое и выводит его за пределы установки (со стороны задней стенки). В это же время поддерживающие призмы *11* занимают исходное положение, щит *8* поднимается, и установка готова к повторению сварки.

Сварка большого числа самых различных изделий может быть механизирована с использованием стандартных колонн и манипуляторов в сочетании с узлами сварочных полуавтоматов и автоматов. Примером такого сочетания может служить установка типа УДГ-512 для сварки плавящимся электродом в среде углекислого газа диафрагм паровых турбин. В установке использованы колонна типа ПК-1 и сварочный манипулятор типа М-11070.

На колонне закреплены две сварочные головки, каждая из которых состоит из механизма подачи сварочной проволоки, сварочной горелки и механизмов корректировки положения горелки. На колонне также установлены две кассеты для электродной проволоки и пульт управления.

На столе манипулятора установлен кантователь, состоящий из ведущей и поддерживающей бабок, в которые устанавливается свариваемая диафрагма. Сварочная ско-

рость обеспечивается вращением стола манипулятора. Сварка ведется в несколько проходов. После сварки одной стороны диафрагма кантуется на 180° и сваривается с другой стороны.

Такое сочетание колонны ПК-1 и манипулятора М-11070 позволяет сваривать крупногабаритные детали большого диапазона типоразмеров, представляющих собой тела вращения.

Установки для сварки обмоток якоря с коллекторными пластинами электрических машин. Применение сварки взамен пайки при изготовлении электрических машин повышает качество соединений и производительность труда. Для дуговой сварки обмоток якоря электродвигателей с коллекторами диаметром 40—1000 мм разработана серия установок типа УДГ-508, УДГ-510 и УДГ-511. Технические данные установок приведены в табл. 3.1.

Сварка осуществляется вольфрамовым электродом в смеси аргона и гелия. При применении только одного аргона ввиду низкой тепловой мощности дуги не обеспечивается необходимая глубина проплавления основного металла и в ряде случаев шов получается пористым. Для экономии гелия дежурная дуга горит в аргоне. Для уменьшения разогрева изделия сварка ведется в импульсном режиме. Величина импульса сварочного тока и его длительность зависят от толщины коллекторных пластин. При толщине пластин 2,5—3,0 мм сварочный ток устанавливают в пределах 120—180 А, время импульса сварочного тока составляет 0,2—0,3 с. При толщине пластин 10—12 мм сварочный ток увеличивают до 360—420 А, а время импульса — до 1,0—1,5 с. Перекрытие предыдущей точки последующей составляет 0,3—0,5 мм, глубина провара равна половине толщины проводника. В процессе сварки температура коллектора не превышает 100 °С.

Базовая модель установок состоит из станка для автоматической сварки, шкафа управления и сварочного выпрямителя типа ВДУ-504. На станке расположены устройства для центрирования и вращения якоря, механизм перемещения сварочных горелок, пульт управления, осциллятор, электродвигатели, пневмоаппаратура, газовая аппаратура, зачистное устройство.

Электрическая схема установки обеспечивает подачу аргона за 1—2 с до начала сварки и прекращение подачи через 2—3 с после ее окончания, возбуждение осцилля-

тором дежурной дуги, поддержание горения дежурной дуги в течение всего времени сварки коллектора, автоматическое включение основного сварочного тока в моменты, когда вольфрамовый электрод находится посредине очередной коллекторной пластины, подачу гелия на период включения основного сварочного тока.

Счет числа свариваемых коллекторных пластин и перевод горелок для сварки последующих рядов пластин осуществляются автоматически.

Автоматы АДА-500-2, АДА-500-3 и АПА-301. Автоматизация дуговой сварки токосъемных узлов, крышек и дна с корпусами аккумуляторов типа ТЖН стала основой повышения качества продукции и эффективности производства. Внедрение на аккумуляторных заводах установок типа АДА-500-2 и АДА-500-3 позволило получить экономический эффект 62 тыс. руб. в год на одну установку. Сварка выполняется неплавящимся электродом сжатой дугой. При сварке сжатой дугой конец вольфрамового электрода углубляется внутрь канала формирующего сопла, а столб дуги обдувается потоком аргона, благодаря чему повышается устойчивость горения дуги и возрастает концентрация ее теплового потока.

Достоинствами этого способа являются отсутствие разбрызгивания электродного металла, низкая чувствительность процесса к изменениям длины дугового промежутка, получение стабильного провара отбортованных кромок в условиях сборки с переменным зазором и превышением свариваемых кромок. Надежность возбуждения сварочной дуги обеспечивается зажиганием дополнительной дуги между вольфрамовым электродом и соплом.

В качестве вольфрамовых электродов применяются прутки из лантанированного вольфрама (ВЛ) диаметром 2 или 3 мм. Конец электрода затачивается на конус на длине, равной 3—4 диаметрам. Диаметр притупления торца должен составлять 1,0—1,5 мм. Углубление электрода внутрь сопла устанавливается в пределах 2—3 мм, а расстояние между нижним срезом сопла и изделием — в пределах 3—5 мм.

Сварка крышек и дна с корпусом ведется по отбортовке. Сварочная ванна защищается от окружающего воздуха дополнительным потоком углекислого газа. При сварке токосъемной шинки с контактными планками ось электрода должна быть направлена на линию их соединения.

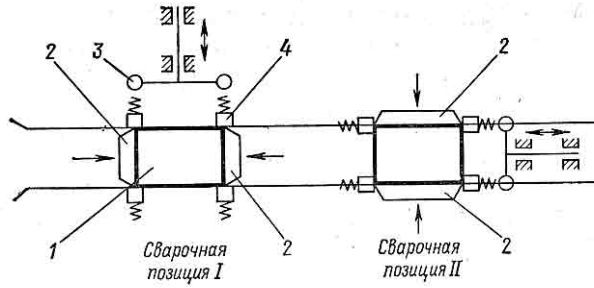


Рис. 3.9. Схема сварочного устройства автоматов типа АДА-500-2 и АДА-500-3

Автоматы АДА-500-2 и АДА-500-3 предназначены для сварки крышки и дна с корпусом аккумуляторов. На автомате АДА-500-2 свариваются аккумуляторы типа ТЖН с размерами 156×118×325, 156×118×390, 156×118×505 и 156×118×440, на автомате АДА-500-3 — с размерами 156×141×450, 156×141×505 и 156×141×555.

Автоматы состоят из сварочного станка, выпрямителя типа ВДГ-601 и четырех балластных реостатов типа РБ-301. Газовая аппаратура и электрическое устройство смонтированы на сварочном станке. Корпус аккумулятора с впрессованными в него дном или крышкой с транспортера поступает в желоб сварочного станка. Захваты с пневматическим приводом перемещают корпус на сварочную позицию *I* (рис. 3.9). Корпус подается пневматическим цилиндром вверх до упора и фиксируется с двух сторон пневматическими прижимами *2*, а с других двух сторон — пружинными прижимами *4*. Надежное прижатие корпуса аккумулятора *1* к его крышке или дну необходимо для устранения существующих зазоров между ними и для предотвращения возникновения зазоров во время сварки. Зажатие пневматическими прижимами осуществляется на каждой из сварочных позиций только по тем сторонам, по которым ведется сварка. Сварка происходит одновременно на обеих сварочных позициях, причем на каждой позиции одновременно двумя горелками *3*.

Сварка начинается и заканчивается на медных подпружиненных водоохлаждаемых колодках, которые плотно поджаты к корпусу аккумулятора. На каждой из позиций обе горелки имеют единый электромеханический привод, причем если один корпус аккумулятора сваривается при выдвижении горелок вперед, то следу-

ющий корпус сваривается при возвратном движении их. После окончания сварочного цикла захваты одновременно перемещают несваренный корпус аккумулятора на сварочную позицию *I*, затем с позиции *I* на позицию *II* и сваренный корпус с позиции *II* на ленту транспортера. Расчетная производительность — 120 корпусов в час.

Автомат АПА-301 предназначен для сварки сжатой дугой продольных швов соединений контактных планок с шиной токосъемного узла аккумулятора типа ТЖН-250. Автомат состоит из сварочного станка и четырех балластных реостатов. В качестве источника сварочного тока может быть использован выпрямитель ВДГ-601 или многопостовой выпрямитель.

Сварочный станок включает в себя следующие основные узлы:

устройство для зажатия и фиксации блока аккумулятора, состоящее из двух столов, перемещающихся при помощи пневмоцилиндров по цилиндрическим направляющим;

П-образную стойку из швеллеров, служащую для крепления пневмоцилиндров, прижимающих борны;

механизм перемещения сварочных горелок, состоящий из трехфазного асинхронного двигателя мощностью 120 Вт, редуктора, суппорта и четырех сварочных горелок.

Все узлы расположены внутри кожуха. Сварка ведется одновременно четырьмя горелками.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

СВАРКА ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ ПОД ФЛЮСОМ И В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

4.1. СВАРКА ПОД ФЛЮСОМ

Автоматическая сварка под флюсом широко применяется в промышленности. Способ сварки под флюсом является универсальным и весьма экономичным, обладает широкими технологическими возможностями и обеспечивает высокое качество сварного соединения. Швы получаются ровными, с плавным переходом к основному металлу, без пор и шлаковых включений. Практически отсутствуют потери металла на угар и разбрызгивание.

Применение высоких плотностей тока в электродах позволяет производить сварку металла значительной толщины без разделки кромок

на повышенных скоростях. Производительность при сварке под флюсом в несколько раз выше, чем при ручной сварке покрытыми электродами.

По ГОСТ 9087—81 «Флюсы сварочные плавленые. Технические условия» наша промышленность выпускает флюсы, обеспечивающие сварку углеродистых, низко- и высоколегированных сталей, меди, алюминия и их сплавов.

Основным назначением флюса является защита расплавленного металла от вредного воздействия кислорода и азота воздуха. Кроме того, флюс должен обеспечивать хорошее формирование шва, надлежащий химический состав металла шва, высокие механические свойства сварного соединения, отсутствие пор и трещин в наплавленном металле, устойчивость процесса сварки, легкую удаляемость шлаковой корки с поверхности шва. В процессе сварки флюсы не должны выделять в большом количестве вредные газы и дым, которые могут отравлять работающих.

Для сварки и наплавки углеродистых и низколегированных сталей применяются флюсы ОСЦ-45 и АН-348. Эти флюсы являются наиболее распространенными и производятся нашей промышленностью в больших количествах. По своим сварочным свойствам они близки.

Флюс ОСЦ-45 малочувствителен к ржавчине, содержащейся на поверхности основного металла, обеспечивает получение плотных швов, стойких против образования трещин. К недостаткам флюса можно отнести высокое содержание фтора, выделение которого может приводить к отравлению работающих в замкнутых пространствах, внутри котлов, в резервуарах и т. п.

Флюс АН-348 обеспечивает несколько бо́льшую устойчивость горения дуги и по сравнению с флюсом ОСЦ-45 выделяет меньше вредных газов вследствие пониженного содержания фтористого кальция.

По структуре зерен плавленые флюсы делятся на стекловидные, пемзовидные (пористые) и кристаллические. Стекловидные флюсы имеют светло-серый, желтый и коричневый цвета разных оттенков. Зерна пемзовидного флюса — светлых оттенков. Стекловидный флюс по сравнению с пемзовидным обеспечивает более совершенную защиту зоны сварки от действия воздуха.

Для сварки проволокой диаметром менее 3 мм применяется стекловидный флюс с размерами зерен 0,25—1,0 мм, а для сварки проволокой диаметром 3 мм и более — с размерами зерен 0,35—3,0 мм.

Металлургические особенности и характеристики процесса сварки. При дуговой сварке параметры технологического процесса, например толщина металла, сварочный ток, напряжение дуги, скорость сварки, диаметр электродов, изменяются в широких пределах.

Качество сварки зависит от ряда факторов, к которым относятся геометрические размеры и форма сварного шва, химический состав и структура металла шва и околошовной зоны, отсутствие трещин, включений, пор и других дефектов в местах соединений.

В процессе сварки между жидким флюсом и металлом протекают металлургические реакции, в результате которых происходит восстановление находящихся во флюсе окислов марганца и кремния, и за счет этого металл шва обогащается этими элементами. Образующаяся в процессе реакции закись железа FeO переходит в шлак.

Переход марганца и кремния из флюса в металл шва зависит от содержания этих элементов в проволоке и флюсе и от режима сварки. С увеличением содержания марганца и кремния во флюсе возрастает интенсивность перехода их в шов. С увеличением сварочного тока пере-

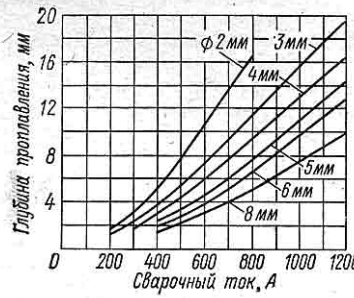


Рис. 4.1. Зависимость глубины проплавления от тока и диаметра электродной проволоки ($v_{св}$ = 30 м/ч)

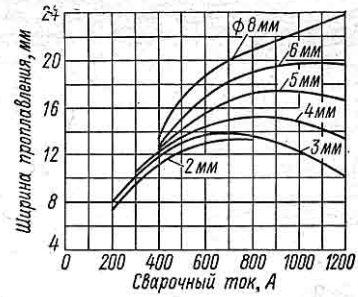


Рис. 4.2. Зависимость ширины проплавления от тока и диаметра электродной проволоки ($v_{св}$ = = 30 м/ч)

ход в шов марганца и кремния уменьшается, а при увеличении напряжения на дуге — увеличивается. Это связано с изменением соотношения между количеством расплавленного флюса и металла. шва. Увеличение сварочного тока приводит к повышению доли расплавленного основного металла в металле шва, а повышение напряжения дуги — к увеличению количества расплавленного флюса. В процессе сварки происходит выгорание углерода и выделение его окиси из металла во время затвердевания, при недостаточном содержании в сварочной ванне марганца и кремния в металле шва образуются поры.

Для дуговой сварки различных сталей стандартом (ГОСТ 2246—70) предусматривается выпуск холоднотянутой сварочной проволоки из углеродистой, легированной и высоколегированной стали. Всего в стандарт включено 75 марок сварочной проволоки диаметром 0,3—12 мм. Для автоматической и полуавтоматической сварки наиболее широко используется проволока диаметром 0,8—6,0 мм.

Подбором марки сварочной проволоки и флюса, а также изменением режима сварки можно регулировать химический состав металла шва. Для сварки среднеуглеродистой стали применяют проволоку с повышенным содержанием марганца (марки Св-08ГА и Св-08Г2).

Необходимое значение сварочного тока зависит от толщины металла свариваемого изделия, диаметра электродной проволоки, подготовки кромок и вида соединения.

При автоматической сварке под флюсом вследствие превосходной защиты расплавленного металла и подвода тока на близком расстоянии от дуги оказывается возможным значительно повысить плотность тока, не опасаясь повышенного нагрева и окисления конца электродной проволоки. При автоматической и полуавтоматической сварке под флюсом можно применять электродную проволоку малых диаметров при весьма высокой плотности тока. Так, применение электродной проволоки диаметром 2 мм при токе высокой плотности обеспечивает сварку за один проход стыковых соединений толщиной до 20 мм.

Значение сварочного тока и диаметр электродной проволоки оказывают исключительно большое влияние на глубину проплавления основного металла, что наглядно иллюстрируется представленными на рис. 4.1 кривыми изменения глубины проплавления основного металла в зависимости от тока для электродной проволоки диаметром 2—8 мм. При малых диаметрах электродной проволоки глубина проплавления

основного металла при одинаковых токах значительно выше, чем при больших диаметрах. Например, при сварке током 400 А электродной проволокой диаметром 2 мм глубина проплавления составляет 5 мм, а проволокой диаметром 6 мм — всего 1,9 мм; при сварке током 600 А глубина проплавления соответственно равна 10,5 и 3,8 мм, т. е. с увеличением диаметра электродной проволоки в три раза глубина проплавления снижается примерно в 2,7 раза. Следовательно, не изменяя значения сварочного тока, а уменьшая лишь диаметр электродной проволоки, можно значительно увеличить глубину проплавления основного металла.

Кривые, характеризующие изменение ширины проплавления основного металла в зависимости от силы тока и диаметра электродной проволоки, приведены на рис. 4.2. Они показывают, что при прочих равных условиях с увеличением диаметра электродной проволоки ширина проплавления основного металла возрастает. Наиболее заметно ширина проплавления изменяется при повышенных токах. При больших плотностях тока и недостаточных напряжениях дуги ширина проплавления может уменьшаться вследствие значительного погружения электрода в основной металл. Для того чтобы придать шву необходимую форму, с увеличением плотности тока требуется некоторое повышение напряжения дуги, причем меньшим диаметрам электродной проволоки соответствуют более высокие оптимальные напряжения.

Соотношения между глубиной и шириной проплавления изменяются в больших пределах. Коэффициент формы шва (отношение ширины проплавления к его глубине) при малых токах и больших диаметрах электродной проволоки имеет более высокие значения. Следовательно, электроды малого диаметра при сварке током повышенной плотности следует применять для получения узкого шва с глубоким проплавлением, а электроды большого диаметра при сварке током пониженной плотности — для получения широкого шва с небольшим проплавлением основного металла (например, наплавочные работы). Таким образом, изменяя значение сварочного тока и диаметр электродной проволоки, можно в широких пределах изменять форму шва.

Значение оптимального напряжения дуги зависит от ряда факторов: силы тока, диаметра электродной проволоки, рода и полярности тока, состава флюса. С изменением напряжения дуги изменяются параметры шва. При слишком низком напряжении дуга горит нестабильно, поверхность шва получается неровной, бугристой. С повышением напряжения дуги формирование шва улучшается: он становится более широким и ровным, с незначительным усилением. При чрезмерном увеличении напряжения стабильность горения дуги снижается, ширина провара может уменьшаться, сопровождаясь ухудшением формирования шва. Для обеспечения правильного формирования шва с уменьшением диаметра электродной проволоки и увеличением плотности тока необходимо повышать напряжение дуги.

Сварку под флюсом можно производить как на переменном, так и на постоянном токе. При сварке на постоянном токе большое значение имеет полярность тока. В обычных условиях сварку следует производить на токе обратной полярности (плюс на электроде).

Средние рекомендуемые напряжения дуги при сварке стыковых соединений низкоуглеродистых сталей под флюсом ОСЦ-45 и АН-348 электродной проволокой Св-08 диаметром 2 и 5 мм в зависимости от сварочного тока приведены в табл. 4.1.

Более низкое напряжение дуги требуется при обратной полярности тока. Для переменного тока рекомендуемые напряжения дуги лежат

Таблица 4.1

Диаметр электрода, мм	Род тока	Напряжение дуги, В, при сварочном токе, А						
		200	300	400	500	600	800	1000
2	Переменный	30—32	32—34	34—38	38—42	42—46	—	—
	Постоянный обратной полярности	29—31	31—33	33—36	36—40	40—44	—	—
5	Переменный	—	—	—	32—35	34—38	36—40	40—44
	Постоянный обратной полярности	—	—	—	30—34	32—36	34—38	38—42

в промежутке между напряжениями для прямой и обратной полярности, с большим приближением к прямой полярности.

Необходимость более низкого напряжения дуги при обратной полярности тока объясняется малой подвижностью ее. В этом случае дуга горит весьма стабильно, в процессе сварки наблюдаются лишь очень незначительные колебания ее напряжения. При сварке током прямой полярности колебания напряжения дуги происходят в более широком диапазоне, что объясняется блужданием дуги по поверхности ванны расплавленного металла. Малой подвижностью дуги при обратной полярности тока объясняется более глубокое проплавление основного металла.

При сварке малых толщин для обеспечения стабильного процесса вместо переменного тока следует применять постоянный ток обратной полярности. В этом случае при использовании электродной проволоки диаметром 2 мм сварку можно производить током 180—200 А.

Скорость сварки меньше влияет на параметры шва, чем значение сварочного тока. С увеличением скорости сварки при неизменном токе и напряжении дуги время воздействия дуги на основной металл и количество выделяющейся теплоты на единицу длины шва снижаются, вследствие чего глубина и ширина проплавления уменьшаются. При скоростях сварки более 70—80 м/ч возможно образование подрезов, что частично можно устранить увеличением напряжения дуги. Для обеспечения повышенной скорости сварки применяется двух- и трехдуговая сварка.

На производительность процесса сварки большое влияние оказывает правильный выбор режима сварки, который зависит от многих переменных величин, тесно связанных между собой. При выборе оптимальных величин нужно исходить из необходимости получения максимальной производительности при высоких показателях качества сварного соединения. Повысить производительность процесса сварки в основном можно за счет применения более высоких значений сварочного тока, увеличения коэффициента расплавления электродной проволоки, умень-

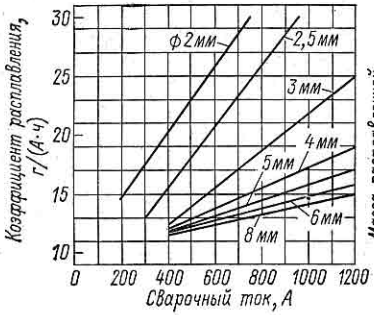


Рис. 4.3. Зависимость коэффициента расплавления от тока и диаметра электродной проволоки ($v_{св} = 30$ м/ч)

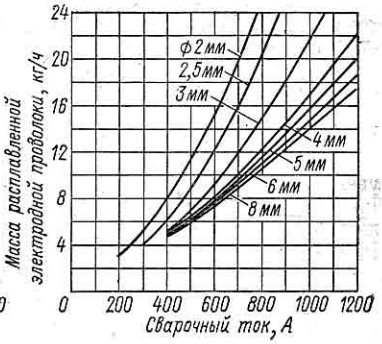


Рис. 4.4. Зависимость массы расплавленного электродного металла от тока и диаметра электродной проволоки ($v_{св} = 30$ м/ч)

шения потерь на угар и разбрызгивание, уменьшения угла разделки кромок сварного соединения, снижения вспомогательного времени, в частности путем уменьшения числа проходов (слоев).

Для получения оптимальных результатов процесса сварки должны быть правильно выбраны значения сварочного тока, диаметр электродной проволоки, напряжение дуги, скорость сварки, форма подготовки и угол разделки кромок сварного соединения.

Масса электродного металла, необходимого для сварки стыкового соединения, зависит от сечения шва. При сварке на больших токах, обеспечивающих значительную глубину проплавления основного металла, угол разделки кромок, а следовательно, и сечение шва могут быть уменьшены.

Масса электродного металла $Q_р$, расплавляемого в единицу времени, определяется из уравнения

$$Q_р = \alpha_р I_{св} t_{осн}, \qquad (4.1)$$

где $\alpha_р$ — коэффициент расплавления, г/(А·ч); $I_{св}$ — сварочный ток, А; $t_{осн}$ — основное время горения дуги, ч.

Коэффициент расплавления $\alpha_р$ показывает, сколько расплавляется электродного металла в граммах за 1 ч горения дуги под действием тока 1 А. Следовательно, масса расплавляемого электродного металла за 1 ч определяется значением сварочного тока и коэффициентом расплавления.

При сварке под флюсом потери электродного металла на угар и разбрызгивание практически отсутствуют (не превышают 1 % от массы расплавленной электродной проволоки). Поэтому можно считать, что весь расплавленный электродный металл переходит в шов, т. е. масса наплавленного металла равна массе расплавленного электродного металла.

На рис. 4.3 приведены зависимости коэффициента расплавления электродной проволоки диаметром 2—8 мм от сварочного тока. При сварке под флюсом $\alpha_р$ в зависимости от тока и диаметра электродной проволоки может изменяться в больших пределах. С увеличением сварочного тока и уменьшением диаметра электродной проволоки коэффи-

циент расплавления возрастает. Особенно значительно коэффициент расплавления изменяется при сварке электродной проволокой малых диаметров. Так, при применении электродной проволоки диаметром 2 мм с увеличением тока от 200 до 700 А коэффициент расплавления изменяется от 14,6 до 28,5 г/(А·ч), а при использовании электродной проволоки диаметром 6 мм с увеличением тока от 400 до 1200 А коэффициент расплавления изменяется от 11,6 до 15,6 г/(А·ч).

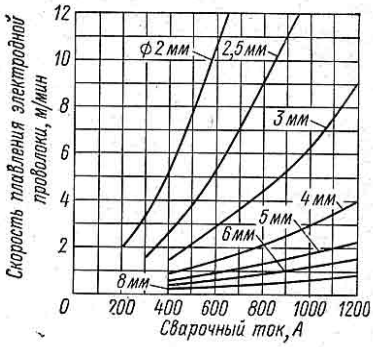


Рис. 4.5. Зависимость скорости плавления электродной проволоки от тока и диаметра электрода ($v_{св}$ = 30 м/ч)

Изменение скорости сварки в пределах 20—100 м/ч не оказывает заметного влияния на коэффициент расплавления. Увеличение вылета электрода приводит к изменению предварительного нагрева конца электрода и соответственно к увеличению коэффициента расплавления

Выше было отмечено что одним из показателей, характеризующих производительность процесса сварки, является масса наплавленного металла в единицу времени. Зависимость массы расплавляемой электродной проволоки диаметром 2—8 мм от сварочного тока показана на рис. 4.4. Расход флюса примерно в 1,2 раза превышает массу наплавленного электродного металла.

Применение электродной проволоки малых диаметров (2—3 мм) характеризуется более высокой производительностью плавления электродного металла. При использовании электродной проволоки диаметром 2 мм для расплавления одинакового количества электродного металла сварочный ток может быть меньше на 35—40 %, чем при применении электродной проволоки диаметром 5 мм и на 40—45 % — при проволоке диаметром 6 мм.

Необходимо учитывать, что при сварке электродной проволокой малых диаметров вследствие глубокого проплавления поперечные сечения стыковых швов могут быть уменьшены за счет уменьшения угла разделки и могут быть уменьшены катеты угловых швов по сравнению с катетами, выполняемыми электродной проволокой диаметром 4—5 мм. Поэтому при применении проволоки малых диаметров стоимость сварки единицы длины шва может быть снижена.

Для электродной проволоки диаметром 2 мм можно рекомендовать сварочный ток до 600 А. Применение более высоких значений тока потребует повышения напряжения дуги, а следовательно и увеличения напряжения холостого хода источника питания дуги.

На рис. 4.5 показано изменение линейной скорости плавления электродной проволоки диаметром 2—8 мм в зависимости от сварочного тока.

Род и полярность тока заметно влияют на скорость плавления электродной проволоки. При сварке на одинаковых токах скорость плавления при обратной полярности (плюс на электроде) на 20—30 % ниже, чем при прямой полярности, и на 15—20 % ниже, чем при переменном токе. При сварке на постоянном токе стыковых соединений без

скоса кромок и угловых соединений с малым катетом следует применять ток обратной полярности. При сварочных работах, связанных с необходимостью наплавления большого количества металла, целесообразно использовать ток прямой полярности.

Удельный расход электроэнергии (мощность в киловатт-часах, расходуемая на плавление 1 кг электродного металла) в случае применения электродной проволоки малых диаметров снижается. При расплавлении электродного металла в пределах 10—20 кг/ч удельный расход электроэнергии при использовании проволоки диаметром 2 мм составляет 1,7—1,8 кВт·ч/кг, а диаметром 5—6 мм — примерно 2,4—2,6 кВт·ч/кг. Следовательно, при сварке электродной проволокой диаметром 5—6 мм удельный расход электроэнергии примерно на 40 % выше, чем при сварке электродной проволокой диаметром 2 мм.

Подготовка изделий под сварку и режимы сварки. Автоматическая и полуавтоматическая сварка под флюсом обычно выполняется в нижнем положении шва.

ГОСТ 8713—79 «Сварка под флюсом. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры» предусматривает виды сварных соединений, формы подготовки кромок, характер и формы поперечного сечения выполненного шва, конструктивные элементы подготавливаемых кромок для соединений без скоса кромок и имеющих односторонний и двусторонний симметричный скос кромок. Этот стандарт предусматривает также подготовку кромок с криволинейным и ступенчатым скосом как одной кромки, так и двух кромок соединяемых деталей.

Сварка под флюсом может выполняться с применением флюсовых подушек, подкладок и подварочного шва.

При сборке деталей для сварки необходимо обеспечивать совпадение кромок и выдерживать установленный нормами размер зазора между ними. В случаях когда устранение зазора представляет большие затруднения, необходимо принимать меры против протекания расплавленного металла и флюса, применяя подварку либо выполняя сварку на флюсовой подушке, на флюсомедной подкладке (медная подкладка с канавкой, заполненной флюсом) и т. д.

Смещение (превышение) свариваемых кромок относительно друг друга не должно быть более 0,5 мм для листов толщиной до 4 мм и 1,0 мм для листов толщиной 4—10 мм; для листов толщиной более 10 мм допустимо смещение до 0,1 толщины листа, но не более 3 мм.

При стыковой сварке листов неодинаковой толщины на листе, имеющем бо́льшую толщину, должен быть сделан скос кромки до толщины тонкого листа. В случае одностороннего превышения кромок скос деластся с одной стороны шириной, равной пятикратной разности толщины листов, а при двустороннем превышении кромок — шириной, в два раза меньшей.

Для придания подлежащим сварке деталям необходимого взаимного расположения их закрепляют прихватками или собирают в специальных приспособлениях. При массовом и серийном изготовлении изделий используют сборочно-сварочные приспособления.

Во избежание образования пор, на стыкуемых под сварку кромках не должно быть влаги, ржавчины, окалины, масла, краски. Загрязнения необходимо тщательно удалять с кромок перед сборкой. Очистка уже собранных под сварку деталей не дает положительных результатов, так как во время зачистки удаляемые загрязнения забиваются в зазоры и вызывают появление пор при сварке. В случае применения при сборке прихваток их перед сваркой надо очистить от шлака.

Стыковые соединения в зависимости от толщины металла могут выполняться без скоса и со скосом кромок, односторонними и двусторонними швами, однопроходными и многопроходными швами.

Автоматическая сварка под флюсом во многих случаях обеспечивает провар всей толщины металла без скоса кромок.

В некоторых случаях для увеличения диапазона толщины изделий, свариваемых без скоса кромок, при сборке создают повышенный зазор. При этом увеличивается глубина проплавления стыкуемого соединения, уменьшается высота усиления и обеспечивается необходимая форма сечения шва. Для устранения протекания расплавленного металла через зазор стыкового соединения сварку выполняют на флюсовой подушке или с применением мер, препятствующих протеканию жидкого металла.

Для повышения производительности труда сварку необходимо выполнять однопроходными швами, однако при сварке металла большой толщины возникает необходимость применять многопроходную сварку со скосом кромок.

Стыковые соединения толщиной до 12 мм можно сваривать без скоса кромок односторонним швом за один проход. Для обеспечения полного провара и необходимого усиления шва между кромками стыкуемого соединения должен быть предусмотрен зазор, зависящий от толщины металла. Протекание расплавленного металла через зазор устраняется применением флюсовых подушек, флюсомедных подкладок.

При односторонней сварке стыковых соединений весьма часто применяют флюсовые подушки. Поджатый с нижней стороны флюс препятствует протеканию металла, часть флюса подушки расплавляется, образует корку и способствует формированию усиления обратной стороны шва. Равномерность сечения и формы шва зависит от равномерности поджатия флюса. При слабом поджатии флюсовой подушки шов получается ослабленным, с большим усилением обратной стороны. При чрезмерном поджатии шов получается с неполным проваром, вогнутым с обратной стороны.

Необходимое давление определяется опытным путем. Поджатие флюсовых подушек к изделию производится в основном сжатым воздухом с применением пневмошлангов. В случае применения флюсомедных подкладок при односторонней сварке соединений без скоса кромок флюс засыпается в зазор и заполняет канавку в медной подкладке. Для этой цели используется флюс мелкой грануляции (размер зерна 0,3—1,0 мм). Расплавляясь в канавке, флюс создает прослойку между металлом шва и медной подкладкой и обеспечивает формирование обратного валика.

Односторонняя сварка на флюсомедной подкладке является весьма рациональной при сварке тонколистового металла. Изменяя размеры канавки медной подкладки, можно регулировать размеры обратного валика. Для устранения протекания металла медная подкладка должна плотно прилегать к основному металлу. Для ее прижатия к свариваемым кромкам можно использовать механические, пневматические и электромагнитные прижимы.

Одностороннюю сварку стыковых соединений без скоса кромок металла толщиной 2—12 мм иногда выполняют на стальной остающейся подкладке. В этом случае режим выбирается таким, чтобы подкладка частично проплавлялась и приваривалась к нижней части кромок, обеспечивая их полный провар. Подкладка должна плотно прилегать к соединяемым кромкам. Зазор между подкладкой и кромками не должен превышать 1,5 мм.

Стыковые соединения без скоса кромок листов толщиной до 22 мм могут свариваться двусторонними швами. В этом случае сварка производится с каждой стороны в режиме, обеспечивающем расплавление основного металла на глубину не менее 0,6 его толщины. При наличии зазора для предотвращения протекания расплавленного металла иногда вместо флюсовой подушки применяют временно прихваченные стальные подкладки из тонких полос. После сварки первого шва подкладку удаляют и производят сварку с обратной стороны.

Сварку металла толщиной более 12 мм, как правило, производят с односторонним скосом двух кромок либо с двумя скосами обеих кромок с применением флюсовых подушек, флюсомедных подкладок, с предварительной подваркой обратной стороны стыка. При одностороннем скосе двух кромок широкое применение находит сварка на остающихся стальных подкладках. При сварке кольцевых швов цилиндрических сосудов часто применяется сварка в замок.

Сварка двусторонних швов вызывает необходимость кантовки изделий, что связано с увеличением времени выполнения работ. При затруднениях с кантовкой изделий двустороннюю сварку производят с предварительной подваркой корня шва в потолочном положении, с применением штучных покрытых электродов. В этом случае основной шов сваривается на весу.

Угловые швы характеризуются катетом и формой шва. Различают три типа угловых швов: нормальный, выпуклый (усиленный) и вогнутый (ослабленный). Форма шва выбирается в зависимости от условий эксплуатации изделий. В сварных конструкциях, работающих под действием вибрационных нагрузок, тавровые и нахлесточные соединения стремятся выполнять вогнутыми швами.

Размер катета шва сварных соединений устанавливается при проектировании. Предельные отклонения катетов шва сварных соединений от номинальных размеров, указанных на чертежах, принимаются следующими: ± 1 мм при катете меньше 6 мм; ± 2 мм при катете, равном или большем 6 мм.

Автоматическую сварку угловых швов можно выполнять вертикальным электродом при положении изделия для сварки в симметричную или несимметричную «лодочку», а также наклонным электродом поперек шва при положении изделия для сварки не «в лодочку».

При сварке в симметричную «лодочку» создаются наиболее благоприятные условия для формирования шва — жидкий расплавленный металл равномерно смачивает обе кромки свариваемого соединения, шов хорошо формируется, образуя плавный переход к основному металлу. Поэтому во всех случаях, когда возможна кантовка изделий, следует применять сварку «в лодочку». При положении «в лодочку» за один проход можно выполнять шьы значительно большего сечения, чем при положении не «в лодочку». При сварке «в лодочку» в связи с большой возможностью протекания жидкого металла и флюса через зазор к сборкс предъявляются более жесткие требования, чем при сварке не «в лодочку».

В практике часто бывает затруднительно установить изделие в положение для сварки «в лодочку». В этих случаях применяют сварку наклонным электродом. Так, при изготовлении балок двутаврового и Н-образного сечения сварка четырех швов «в лодочку» связана с необходимостью трехкратной кантовки. При сварке наклонным электродом при положении изделия для сварки не «в лодочку» требуется лишь одна кантовка. Сокращение числа кантовок обеспечивает повышение производительности труда и снижение стоимости продукции.

При сварке наклонным электродом на параметры углового шва — глубину сплавления по линиям примыкания кромок, размеры горизонтального и вертикального катетов, а также на его форму большое влияние оказывает не только значение сварочного тока, но и диаметр электродной проволоки и угол наклона ее поперек шва.

Глубина проплавления в значительной степени зависит от угла наклона электрода. Для обеспечения максимальной глубины проплавления углового соединения и равенства горизонтального и вертикального катетов при односторонней сварке электродную проволоку необходимо наклонять в плоскости поперечного сечения на угол около 40° к плоскости вертикальной стенки. При сварке электродной проволокой диаметром 2 мм конец ее нужно направлять в вершину угла, при сварке проволокой диаметром 3—5 мм конец электрода из вершины угла следует смещать на горизонтальную полку на расстояние, равное примерно половине диаметра электрода. Возможность получения угловых швов с катетом 3—4 мм является весьма ценным преимуществом применения электродной проволоки диаметром 2 мм. При этом швы с катетом 3—4 мм целесообразно выполнять на постоянном токе обратной полярности. При сварке электродной проволокой диаметром 5 мм швы с катетом меньше 5 мм получить практически невозможно.

При сварке наклонным электродом за один проход обеспечивается возможность получения угловых швов правильной формы с катетом не более 8 мм. При катетах более 8 мм жидкий металл стекает на горизонтальную полку, образуя наплывы, а на вертикальной стенке — подрезы. Для получения полноценных швов с катетом более 8 мм сварку наклонным электродом необходимо производить за несколько проходов.

При сварке угловых швов электродной проволокой диаметром 2 мм вследствие более глубокого проплавления по сравнению с электродной проволокой диаметром 5 мм обеспечивается равнопрочность швов при меньших катетах. Поэтому объем наплавленного металла при сварке электродной проволокой диаметром 2 мм может быть уменьшен на 20—40 %.

Для стабильности процесса сварки и благоприятного формирования угловых швов при сварке на переменном токе под стекловидным флюсом проволокой диаметром 2 мм можно рекомендовать применение сварочного тока 300—400 А. При пемзовидном флюсе стабильность горения дуги и формирование шва значительно улучшаются. Поверхность шва получается более ровной, а при токах более 400 А — менее выпуклой, чем при сварке под стекловидным флюсом. Для сварки угловых швов с катетом 8 мм под пемзовидным флюсом можно применять ток до 500 А, при этом скорость сварки может быть повышена примерно на 20—25 % по сравнению со скоростью сварки под стекловидным флюсом.

Сварка угловых швов нахлесточных соединений выполняется при вертикальном положении электрода с оплавлением верхнего листа и при положении изделия для сварки не «в лодочку». Более благоприятным для формирования шва является расположение соединяемых листов в несимметричную «лодочку». Автоматическую сварку угловых швов следует выполнять проволокой диаметром 2—3 мм.

При сварке стыковых и тавровых соединений вылет электродной проволоки (расстояние от поверхности металла или вершины разделки до торца токоподводящего наконечника) следует устанавливать равным 8—10 диаметрам электродной проволоки.

В промышленности весьма широкое применение находит односторонняя однопроходная автоматическая сварка под флюсом. При этом способе снижаются трудозатраты, повышается производительность и

Таблица 4.2

Толщина листов, мм	Зазор в стыке, мм	Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч
3	0—2	2	275—300	28—30	44
4		2 3	375—400 420—460		40
5	0,5—2,5	2 4	425—450 540—580	32—34 30—32	35 40
6		2 4	440—480 640—680	32—34	30 40
8	0,5—3,5	4 5	820—860 860—900	38—40 36—38	40 37
10		5	940—980	38—40	35

Таблица 4.3

Толщина листов, мм	Зазор в стыке, мм	Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч
4 6 8	1—1,5 2—3,0 2—3,5	4	520—550 600—650 625—675	28—30 28—32 32—36	50 40 34
10 12	3—4 4—5	5	700—750 750—800	34—36 36—40	30 27
16	5—6		900—950	38—40	20
18 20			950—1000	40—42 42—44	17 15

Таблица 4.4

Толщина листов, мм	Номер прохода	Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч
12	1	5	900—940	38—40	26—28
14			940—980	39—41	24—26
16	1		860—900	37—39	30—32
	2		800—840	35—37	32—34
18	1		900—940	36—38	28—30
	2		880—920	38—40	24—26
20	1		960—1000	38—40	28—30
	2		940—980	40—42	24—26
22	1		980—1020	38—40	28—30
	2		940—980	40—42	22—24
24	1		1050—1100	38—40	28—30
	2		950—1000	41—43	18—20
26	1	5	1050—1100	38—40	28—30
	2		950—1000	40—42	20—22
	3	6	1000—1050	42—44	18—20
28	1	5	1050—1100	38—40	29—30
	2		950—1000	40—42	20—22
	3	6	1000—1050	42—44	18—20
30	1	5	1050—1100	38—40	28—30
	2		950—1000	40—42	20—22
	3	6	1000—1050	42—44	18—20
	4			43—45	16—18

сокращаются производственные площади вследствие исключения операции по кантовке изделий.

В табл. 4.2 приведены режимы односторонней однопроходной сварки стыковых соединений листов низкоуглеродистой стали толщиной 3—10 мм без скоса кромок, на флюсомедной подкладке постоянным током обратной полярности. Сварочная проволока Св-08.

В случае сварки на флюсовой подушке листов толщиной 3—6 мм грануляция флюса подушки должна быть мелкой, при большей толщине листов — нормальной. Флюс в подушке поджимается к изделию резиновым или прорезиненным шлангом. Давление воздуха в шланге флю-

Таблица 4.5

Толщина листов, мм	Зазор в стыке, мм	Первый проход			Второй проход		
		Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч
8	До 6	525—575	34—36	40	625—675	36—38	30
10		600—650	35—37		725—775		
12		700—750	36—38		800—850	38—40	
14		750—800	38—40	30	850—900	39—41	
16		800—850		25	900—950	40—42	25
18		850—900			925—975		23
20		875—925		21	950—1000		
22		900—950	38—42				21

совой подушки составляет 0,18—0,25 МПа и подбирается опытным путем.

В табл. 4.3 даны ориентировочные режимы односторонней сварки переменным током стыковых соединений низкоуглеродистой стали без скоса кромок, на флюсовой подушке, с обязательным зазором в стыке. Сварочная проволока Св-08.

Режимы односторонней сварки стыковых соединений листов низкоуглеродистой стали толщиной 12—30 мм с односторонним скосом двух кромок, на флюсомедной подкладке постоянным током обратной полярности приведены в табл. 4.4.

Режимы двусторонней сварки стыковых соединений листов толщиной 8—22 мм без скоса кромок электродной проволокой Св-08 диаметром 5 мм на переменном токе приведены в табл. 4.5.

При многопроходной сварке каждый последующий проход выполняется после очистки от шлака предыдущего прохода.

Режимы сварки тавровых и нахлесточных соединений «в лодочку» с катетом шва 6—12 мм приведены в табл. 4.6. Сварку электродной проволокой Св-08 диаметром 2 мм выполняют под мелким флюсом на переменном токе.

Режимы сварки тавровых и нахлесточных соединений с катетом шва 3—8 мм наклонным электродом (не «в лодочку»), проволокой Св-08 представлены в табл. 4.7.

При двухдуговой сварке первый электрод устанавливается вертикально, а второй — с наклоном вперед под углом 65—70° к горизонтали. Вылет первого электрода устанавливается около 50 мм, расстояние между электродами 15—40 мм. Первый шов как со скосом, так и без скоса кромок сваривается на флюсовой подушке либо на флюсомед-

Таблица 4.6

Катет шва, мм	Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч
6	2	450—475	34—36	40
8	2	475—525		28
	3 4	550—600 575—625		30
	5	675—725	32—34	32
10	2	475—525	34—36	20
	3 4	600—650 650—700		23
	5	725—775	32—34	25
12	2 3	525—575 600—650	34—36	14 15
	4 5	725—775 775—825	36—38	20 18

Таблица 4.7

Катет шва, мм	Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч	Род тока
3	2	200—220	25—28	60	Постоянный
4		280—320	28—30	50	Переменный
5	2 3	340—380 450	32—34 28—30	40 45	
6	2 4	380—420 460—500	32—34 30—32	30 28	
8	2 4	400—440 600—650	34—36	20	

Таблица 4.8

Толщина листа, мм	Зазор в стыке, мм	Диаметр электрода, мм	Сварочный ток дуги, А		Напряжение дуги, В		Скорость варки, м/ч
			первой	второй	первой	второй	
8	3—4	3—4	800—850	850—875	36—40	46—48	80
		4—5	1500—1550	1000—1100	45—50	42—48	120
14	4—5	5—6	2000—2100	1700—1800	40—42	56—60	

Таблица 4.9

Толщина листа, мм	Зазор в стыке, мм	Диаметр электрода, мм	Сварочный ток дуги, А		Напряжение дуги, В		Скорость сварки, м/ч
			первой	второй	первой	второй	
8 12	1—2	5	825	700	36		60 50
14 16 20	2—4		850		38	38	40 36 30
24	4—5		900	750	40		26
28	5—6		1000				24
30	6—7		1100	800		40	

ной подкладке. Режимы автоматической двухдуговой односторонней сварки стыковых соединений листов низкоуглеродистой стали толщиной 8—14 мм без скоса кромок, на флюсомедной подкладке, проволокой Св-08 на переменном токе приведены в табл. 4.8. Режимы автоматической двухдуговой двусторонней сварки стыковых соединений листов толщиной 8—30 мм без скоса кромок проволокой Св-08 на переменном токе даны в табл. 4.9.

При двухдуговой сварке со скоростью 140 м/ч шов формируется неудовлетворительно, поэтому для обеспечения более высоких скоростей сварки при хорошем формировании шва используются три дуги.

При трехдуговой сварке все дуги горят в одну общую ванну. Первый, ведущий, электрод устанавливается с наклоном назад под углом 15° к вертикали, он обеспечивает глубокое проплавление. Второй элек-

Таблица 4.10

Толщина стенки, мм	Первая дуга		Вторая дуга		Третья дуга		Скорость сварки, м/ч
	Сила тока, А	Напряжение, В	Сила тока, А	Напряжение, В	Сила тока, А	Напряжение, В	
12—12,5	1150—1250	35—40	1050—1100	40—45	900—1000	45—50	155—160
14,5—15,2	1250—1350						140—145
16,5—17,5			1050—1200				125—135

трод наклонен вперед под углом 15° к вертикали, он увеличивает проплавление и в основном начинает формирование шва. Третий электрод наклонен под углом 45°, при сварке этим электродом происходит выравнивание шва и устраняется образование подрезов. Конец второго электрода располагается на расстоянии 15—20 мм от первого электрода, конец третьего электрода — на расстоянии 20—25 мм от второго.

При трехдуговой сварке можно получить швы с хорошим формированием при скорости сварки до 250 м/ч.

Режимы автоматической трехдуговой сварки стыковых наружных швов труб с толщиной стенок 12—17,5 мм под флюсом АН-60, электродной проволокой Св-08 диаметром 4 мм на переменном токе приведены в табл. 4.10.

Для сварки под флюсом отечественной промышленностью серийно выпускаются следующие автоматы общего назначения: АДФ-1001, АДФ-1002 и А-1412 — для сварки на переменном токе, АДФ-1201 и А-1416 — для сварки на постоянном токе.

4.2. СВАРКА В УГЛЕКИСЛОМ ГАЗЕ

Особенность сварки в углекислом газе заключается в применении электродной проволоки с повышенным содержанием элементов-раскислителей. Для сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей широко используют кремнемарганцовистую проволоку. Наибольшее применение получила проволока марки Св-08Г2С.

Полуавтоматическая сварка осуществляется с применением проволоки диаметром 0,8—2,0 мм, возможна сварка сталей различной толщины во всех пространственных положениях. Автоматическая сварка производится преимущественно с применением проволоки диаметром 1,0—3,0 мм. Сварка в углекислом газе проволокой диаметром 0,8—1,4 мм вытесняет ручную дуговую сварку металла толщиной 1—3 мм.

По сравнению со сваркой под флюсом недостатками сварки в углекислом газе являются большое разбрызгивание металла, повышенное выделение дыма и аэрозолей, необходимость защиты от света дуги и защиты дуги от ветра. Кроме того, желательно улучшение внешнего вида шва. Для сварки в углекислом газе характерны бугристость шва и более резкий переход металла шва к основному металлу по сравнению со сваркой под флюсом. Брызги засоряют сопло, что нарушает защиту расплавленного металла. Кроме того, брызги привариваются к изделию, для очистки от них требуется значительное время.

Уменьшения разбрызгивания и улучшения внешнего вида шва можно достичь применением смеси газов и порошковой проволоки.

Для дуговой сварки плавящимся электродом используют углекислый газ по ГОСТ 8050—76 «Двуокись углерода газообразная и жидкая. Технические условия».

В зависимости от области применения двуокись углерода выпускают трех марок: сварочную, пищевую, техническую. Для получения швов высокого качества необходимо применять сварочную углекислоту либо пищевую с дополнительной ее осушкой от избытка влаги.

При централизованном питании газ подается по трубопроводу, к которому подключены отдельные сварочные посты. К цеховому трубопроводу газ поступает от рампы баллонов, из изотермической емкости или от заводской углекислотной станции. При индивидуальной системе каждый сварочный пост питается от одного или нескольких баллонов с углекислым газом. В баллонах углекислота транспортируется в жидком состоянии под давлением до 5 МПа (50 атм). В стандартный баллон вместимостью 40 л заливается 25 кг жидкой углекислоты. Из баллона она забирается в газообразном состоянии. Двуокись углерода нетоксична и не взрывоопасна.

Содержание в рабочей зоне углекислого газа до 0,5 % объема воздуха не представляет опасности для здоровья, при более высоком содержании он оказывает вредное влияние. Двуокись углерода тяжелее воздуха и может накапливаться в слабопроветренных помещениях у пола, снижать содержание кислорода в воздухе.

Подвод воды и защитного газа к сварочным установкам производится резиновым рукавом по ГОСТ 9356—75 с внутренним диаметром 9 мм и толщиной стенки 3 мм. В установках с водяным охлаждением расход воды со-

ставляет 120 л/ч. Расход углекислого газа для номинальных токов 200, 315, 500 и 630 А соответственно составляет 600, 900, 1200 и 1400 л/ч.

Углекислый газ защищает расплавленный металл от соприкосновения с воздухом, который особо вреден для сварки вследствие присутствия в нем азота, вызывающего пористость и хрупкость металла шва.

При сварке часть углекислого газа при высокой температуре в столбе дуги диссоциирует с образованием окиси углерода и свободного кислорода согласно уравнению

$$CO_2 \rightleftarrows CO + \frac{1}{2} O_2. \qquad (4.2)$$

Жидкий металл сварочной ванны окружен атмосферой, состоящей из углекислого газа, окиси углерода и кислорода. Газы вступают в реакцию с расплавленным металлом, окисляя отдельные его компоненты. Взаимодействие газов с расплавленным металлом зависит от режима сварки и состава металла. При сварке низкоуглеродистой стали наблюдаются значительные потери марганца и кремния.

Окисление расплавленного металла в углекислом газе может протекать в соответствии со следующим уравнением:

$$Fe + CO_2 \rightleftarrows FeO + CO. \qquad (4.3)$$

Образовавшаяся свободная закись железа вступает в реакцию с марганцем и кремнием, образует соединения MnO и SiO_2, поднимающиеся на поверхность расплавленного металла. В процессе сварки на поверхности ванночки можно наблюдать перемещающийся за дугой шлак, который периодически откладывается тонким слоем у основания и на поверхности шва.

Образующаяся при реакциях ядовитая окись углерода CO при соприкосновении с атмосферой воздуха в значительной мере окисляется снова и превращается в CO_2.

При сварке в углекислом газе на содержание в металле шва марганца и кремния большое влияние оказывает напряжение дуги (длина дуги). С увеличением напряжения потери марганца и кремния значительно возрастают вследствие окисления. Так, при сварке стали Ст.3 с применением сварочной проволоки марки Св-08Г2С с увеличением напряжения дуги с 16 до 37 В содержание марганца в шве уменьшилось с 0,73 до 0,25 %, а содержание кремния — с 0,59 до 0,14 %. Содержание

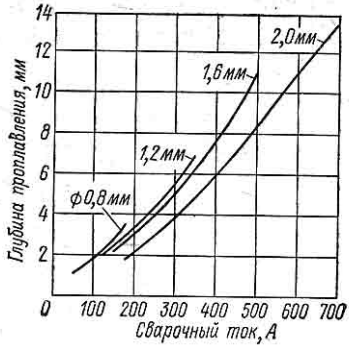


Рис. 4.6. Зависимость глубины проплавления при сварке в углекислом газе от тока и диаметра электрода ($v_{св}$ = = 30 м/ч, ток обратной полярности)

углерода в шве практически не изменилось. Более низкие потери марганца и кремния при короткой дуге, когда перенос капель электродного металла происходит с короткими замыканиями дугового промежутка, можно объяснить сокращением времени переноса капель через дуговой промежуток в сварочную ванну, а значит, и сокращением времени реакции между газом и переносимыми каплями. Значительное уменьшение содержания марганца в металле шва может снизить механическую прочность сварного соединения, поэтому применение длинной дуги с крупнокапельным переносом электродного металла следует считать недопустимым. Применяя легированную сварочную проволоку, можно в широких пределах изменять состав и свойства металла шва. Весьма важным показателем, характеризующим параметры шва, является глубина проплавления основного металла. Зависимость глубины проплавления от сварочного тока для проволоки диаметром 0,8; 1,2; 1,6; 2,0 и 3,0 мм при скорости сварки 30 м/ч и расходе углекислого газа 1000 л/ч иллюстрируется кривыми, приведенными на рис. 4.6. Вылет электрода обычно устанавливается равным 10 диаметрам электрода. Основным фактором, влияющим на глубину проплавления, является значение сварочного тока, причем, как видно из рис. 4.6, с увеличением сварочного тока интенсивно растет глубина проплавления. Из сравнения кривых также видно, что при одинаковых сварочных токах глубина проплавления с уменьшением диаметра электрода увеличивается. Следовательно, для получения одинаковой глубины проплавления при более тонкой проволоке требуется меньший сварочный ток. Наблюдаемое в данном случае увеличение глубины проплавления с уменьшением диаметра электрода можно объяснить увеличением плотности тока, а следовательно, и увеличением удельного давления дуги на ванну расплавленного металла. Чем выше плот-

ность тока, тем больше глубина проплавления. При наплавочных работах с целью уменьшения глубины проплавления необходимо применять электродную проволоку бóльших диаметров, чем при сварке встык с глубоким проплавлением. Опытные данные показывают, что глубина проплавления при сварке в углекислом газе несколько выше, чем при сварке под флюсом.

На параметры шва влияют напряжение дуги и скорость сварки. Длина (напряжение) дуги оказывает существенное влияние на глубину проплавления основного металла. Наиболее глубокое проплавление получается при короткой дуге. Так, например, при сварке электродной проволокой диаметром 1,6 и 2 мм на токе 400 А при напряжении дуги 30 В глубина проплавления на 25—30 % выше, чем при напряжении 40 В. Укорочение дуги при сварке в углекислом газе способствует получению плотных швов и уменьшению разбрызгивания металла. Однако при очень короткой дуге шов получается узким и высоким.

При выборе напряжения дуги необходимо руководствоваться требованием образования минимального количества брызг при получении оптимальной формы шва. При сварке в углекислом газе изменение длины дуги допускается в более узких пределах, чем при сварке под флюсом. Длина дуги является одним из основных технологических факторов, определяющих качество сварки в углекислом газе.

На рис. 4.7 приведены рекомендуемые напряжения дуги в зависимости от сварочного тока для проволоки Св-08Г2С диаметром 0,8—3 мм. При рекомендуемых напряжениях обеспечивается получение швов правильной формы. С увеличением сварочного тока напряжение дуги возрастает, причем каждому диаметру проволоки соответствует свое оптимальное напряжение дуги.

Скорость сварки по сравнению с током и напряжением дуги оказывает меньшее влияние на глубину проплавления. Так, при сварке током 400 А с увеличением скорости сварки с 20 до 60 м/ч, т. е. в три раза, глубина проплавления уменьшилась с 7 до 4,5 мм, т. е. примерно в 1,6 раза.

Ширина проплавления основного металла зависит от тока, напряжения дуги, скорости сварки и диаметра электродной проволоки. Для применяемых на практике режимов сварки с возрастанием сварочного тока ширина

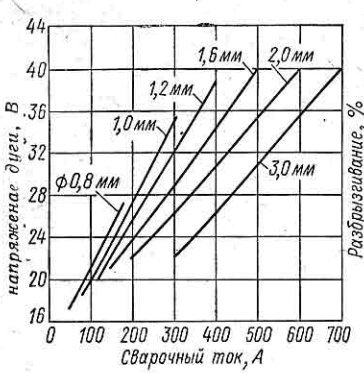


Рис. 4.7. Рекомендуемые напряжения дуги для электродной проволоки Св-08Г2С различных диаметров при сварке в углекислом газе ($v_{св} = 30$ м/ч, ток обратной полярности)

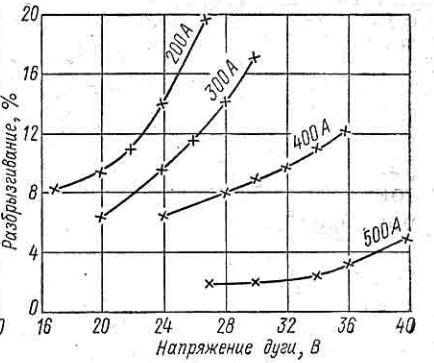


Рис. 4.8. Разбрызгивание электродного металла в зависимости от напряжения дуги и тока при сварке в углекислом газе (диаметр проволоки 2 мм, ток обратной полярности)

проплавления увеличивается. Увеличение скорости сварки приводит к уменьшению ширины проплавления, а рост напряжения дуги — к ее увеличению. При переходе на малые диаметры электродной проволоки ширина проплавления уменьшается.

Сварка в углекислом газе обычно характеризуется повышенным разбрызгиванием электродного металла. В процессе сварки часть брызг, осаждаясь на сопле и токоподводящем наконечнике, забивает промежуток между ними, препятствуя выходу углекислого газа, что приводит к ухудшению качества сварного соединения. Поэтому в процессе сварки требуется периодически производить очистку сопла и наконечника от брызг. Для уменьшения прилипания брызг к соплам и наконечникам производится полировка их и искусственное охлаждение.

Разбрызгивание электродного металла в значительной степени зависит от длины дуги, диаметра электрода, полярности и плотности тока. При токе прямой полярности процесс сварки сопровождается большим разбрызгиванием и крупнокапельным переносом электродного металла. Характер изменения разбрызгивания для проволоки диаметром 2 мм в зависимости от напряжения дуги при токах 200, 300, 400 и 500 А иллюстрируется кривыми, приведенными на рис. 4.8. С увеличением напряжения дуги разбрызгивание растет, причем наиболее

интенсивный рост его наблюдается при токах 200 и 300 А. В случае сварки током 200 А разбрызгивание при напряжении дуги 17 В составляет 8 %, а при напряжении 27 В достигает 20 %.

Увеличение сварочного тока приводит к уменьшению разбрызгивания электродного металла. Так, при сварке током 500 А с изменением напряжения дуги от 27 до 40 В разбрызгивание колеблется примерно в пределах от 2 до 5 %. Уменьшение разбрызгивания с увеличением сварочного тока можно объяснить тем, что с повышением плотности тока происходит более мелкокапельный перенос электродного металла и, кроме того, при больших токах дуга погружается в основной металл; при этом образуется глубокая полость, видимая часть дуги уменьшается, а при еще бóльших токах совсем исчезает — капли удерживаются внутри глубокой полости.

Наблюдения показывают, что при одинаковых токах разбрызгивание ниже при меньших диаметрах электродной проволоки. Следовательно, для уменьшения разбрызгивания необходимо применять короткую дугу и сварочную проволоку малых диаметров при высокой плотности тока. Применение высокой плотности тока способствует переносу металла в виде мелких капель.

Исследованиями методом скоростной киносъемки установлено, что при сварке длинной дугой в углекислом газе перенос металла происходит крупными каплями. Одной из основных причин, вызывающих крупнокапельный перенос и разбрызгивание электродного металла при сварке в углекислом газе, являются химические реакции, происходящие в зоне дуги, сопровождающиеся выделением газов, которые способствуют выбрасыванию частиц металла. Предполагается, что сила, отталкивающая каплю вверх и в сторону, действующая против направления переноса металла, создается высоким давлением газа внутри столба дуги, возникающим при диссоциации газа, а также струями пара с поверхности сварочной ванны, ударяющими в каплю.

Образующаяся в процессе горения дуги на конце электрода капля металла по мере увеличения начинает отклоняться вверх, и при длинной дуге большое число крупных капель выбрасывается в сторону либо при переходе через дуговой промежуток взрывается, создавая интенсивное разбрызгивание электродного металла. При короткой дуге электродный металл переходит в сварочную

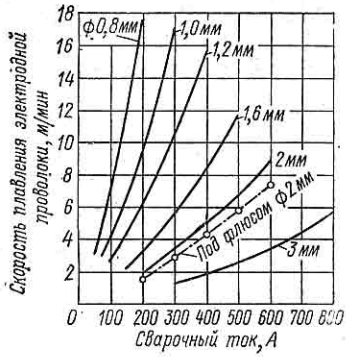


Рис. 4.9. Скорость плавления электродной проволоки Св-08Г2С различных диаметров в зависимости от тока при сварке в углекислом газе (ток обратной полярности)

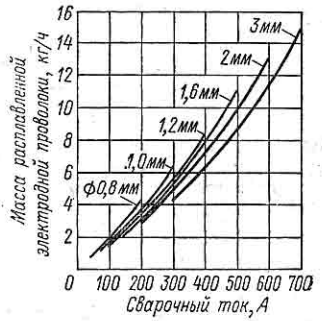


Рис. 4.10. Зависимость массы расплавленной электродной проволоки Св-08Г2С различных диаметров от тока при сварке в углекислом газе (ток обратной полярности)

ванну мелкими каплями. Образующаяся на конце электрода капля, замыкая дуговой промежуток, непосредственно переходит в сварочную ванну, либо под действием тока короткого замыкания мелкая капля металла разрывается и часть мельчайших брызг в значительно меньшем количестве, чем при взрыве крупных капель, выбрасывается из зоны дуги.

Скорость плавления электродной проволоки является весьма важной характеристикой, определяющей производительность процесса сварки. На основании экспериментальных данных на рис. 4.9 построены кривые изменения скорости плавления электродной проволоки Св-08Г2С диаметром 0,8—3 мм в зависимости от сварочного тока при сварке током обратной полярности. Как видно из рисунка, скорость плавления изменяется в широком диапазоне, при этом интенсивность нарастания скорости плавления с увеличением тока повышается.

Исследование влияния напряжения дуги на скорость плавления электродной проволоки диаметром 2 мм при сварке токами 200—600 А показывает, что с увеличением напряжения дуги скорость плавления несколько уменьшается. Однако в связи с весьма незначительным изменением ее можно принимать не зависящей от напряжения дуги. Некоторое снижение скорости плавления электрода

с увеличением напряжения дуги, а следовательно, и столба дуги можно объяснить увеличением тепловых потерь дуги, выделяемых в окружающее пространство излучением и конвекцией, а также уменьшением вылета электрода.

Как показывают экспериментальные данные, изменение скорости сварки в широких пределах практически не влияет на скорость плавления электрода. Существенное влияние на скорость плавления при малых диаметрах электродной проволоки и большой плотности тока оказывает вылет электрода. С увеличением вылета электрода скорость плавления возрастает.

Количество теплоты, выделяющейся в вылете электрода под действием сварочного тока, пропорционально сопротивлению вылета электрода, квадрату силы тока и времени прохождения тока через вылет электрода.

В случае поддержания постоянства длины вылета электрода основными величинами, влияющими на скорость плавления электродной проволоки, являются ее диаметр и сварочный ток.

Зависимость массы расплавляемой электродной проволоки диаметром 0,8—3 мм от сварочного тока характеризуется кривыми, приведенными на рис. 4.10. С увеличением сварочного тока наблюдается более интенсивное нарастание массы расплавленного электродного металла вследствие нагрева вылета электрода. Так, если при токе 200 А (диаметр проволоки 2 мм) масса расплавленного металла (электродного) составляет 2,9 кг/ч, то при токе 500 А она достигает 9,9 кг/ч, т. е. при увеличении тока в 2,5 раза масса расплавленного электродного металла возрастает в 3,4 раза. Необходимо отметить, что с уменьшением диаметра электродной проволоки при одинаковых токах улучшается стабильность процесса горения дуги.

Для сварки в углекислом газе особо характерным является применение электродной проволоки малых диаметров, тока высокой плотности и соответственно большой скорости плавления электрода. При сварке на форсированных режимах тонкими проволоками наиболее целесообразной является плотность тока в электроде 250—450 А/мм^2 [15, 16].

Рациональные как с технологической, так и с экономической точек зрения параметры электродов (диаметр и длина вылета) и напряжение дуги при сварке в углекислом газе проволоками Св-08ГС и Св-08Г2С диаметром 0,8—

Таблица 4.11

Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Диаметр электродной проволоки, мм	Длина вылета электрода, мм	Скорость подачи электродной проволоки, м/ч	Производительность плавления электродного металла, кг/ч
200	27—31	0,8	6—10	660—920	2,6—3,4
250	29—34 28—34	0,8 1,0	6—10 7—15	990—1330 490—850	3,9—5,2 3,0—5,2
300	32—36 31—36	1,0 1,2	10—15 10—22	830—1130 450—790	5,1—7,0 4,0—7,0
350	34—40 33—40	1,0 1,2	10—15 10—22	1050—1450 590—1000	6,5—8,9 5,2—8,9
400	36—42 35—42	1,2 1,4	14—22 14—30	900—1200 510—900	8,0—10,7 6,2—10,7
450	39—45 37—45	1,2 1,4	14—22 14—30	1070—1450 610—1050	9,5—12,8 7,4—12,8
500	40—49	1,2	14—22	1240—1700	11,0—15,0
	38—49	1,4 1,6	14—30 18—38	720—1240 550—980	8,7—15,0
550	43—51 42—51	1,4 1,6	20—30 18—38	1050—1430 640—1100	12,8—17,3 10,0—17,3
600	45—54 43—54	1,4 1,6	20—30 18—38	1200—1630 730—1250	14,6—19,7 11,4—19,7
800	52—58 48—58	1,6 2,0	18—25 20—40	1150—1435 610—960	18,0—23,0 14,6—23,0

2,0 мм низкоуглеродистых и низколегированных сталей на токе обратной полярности при скорости сварки 30—40 м/ч в диапазоне токов 200—800 А приведены в табл. 4.11. Для каждого режима сварки в этой таблице даны 2—3 диаметра электродной проволоки, при которых может быть получен одинаковый результат сварки, т. е. швы с одинаковыми размерами. При этом длины вылетов электродов разных диаметров установлены эквивалентными по их электрическому сопротивлению за счет сохранения постоянства отношения длины вылета электрода к квадрату его диаметра, т. е. $l_э/d_э^2 = \text{const}$.

Основные типы, конструктивные элементы и размеры сварных соединений из сталей, а также сплавов на железоникелевой основе, выполняемых дуговой сваркой в защитном газе, устанавливает ГОСТ 14771—76 «Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры». В стандарте приведены предельные отклонения зазора между кромками соединения, усиления и ширины стыкового шва, допустимые смещения кромок относительно друг друга, а также предельные отклонения катета углового шва от номинального значения.

При автоматической сварке для получения швов высокого качества требуется точная подготовка и сборка деталей под сварку, точное направление электрода по шву и поддержание неизменным режима сварки. Во избежание образования пор должна быть обеспечена чистота сварочной проволоки и соединяемых поверхностей.

Стыковые соединения металла толщиной 0,8—1,2 мм можно сваривать полуавтоматом на медных или стальных подкладках, а также на весу. При сварке на подкладке необходимо обеспечить плотное прилегание листов к подкладке. Сварку изделий малых толщин рекомендуется выполнять в вертикальном положении сверху вниз. При чрезмерно большой ширине шва возможны прожоги, во избежание этого рекомендуется уменьшать напряжение дуги, диаметр электрода, сварочный ток и увеличивать скорость сварки. При сварке в потолочном положении сварочный ток необходимо уменьшать на 10—15 %. Металл толщиной более 3 мм обычно сваривают с двух сторон. Длина вылета электрода устанавливается примерно равной 10 диаметрам электрода.

Режимы автоматической двусторонней сварки стыковых соединений низкоуглеродистой стали проволокой

Толщина листа, мм	Форма подготовленных кромок	Первый		
		Номер прохода	Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, А
6—7	Без скоса кромок	1	1,6	280—300
8—9			2,0	350—400
10—11				
12—13				400—450
14—16			3,0	550—600
17—19				620—650
20—22			4,0	700—750
22—24	С односторонним симметричным скосом кромок			780—800
26—32	С двумя симметричными скосами кромок			800—820

Св-08Г2С на токе обратной полярности приведены в табл. 4.12. Режимы автоматической двусторонней сварки тавровых соединений низкоуглеродистой стали проволокой Св-08Г2С на токе обратной полярности при расходе углекислого газа 900—1200 л/ч даны в табл. 4.13.

Режимы полуавтоматической двусторонней сварки стыковых соединений низкоуглеродистой стали проволокой Св-08Г2С на токе обратной полярности при расходе углекислого газа 400—600 л/ч приведены в табл. 4.14. Режимы

Таблица 4.12

шов		Второй шов				
Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч	Номер прохода	Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч
28—30	30—35	2	1,6	280—300	28—30	30—35
36—38	35—40		2,0	350—400	36—38	35—40
	30—35					30—35
38—40	25—30			400—450	39—41	25—30
31—33	30—35		3,0	550—600	31—33	30—35
	25—30					25—300
32—34	20—25			620—650	32—34	20—25
36—38	25—30		4,0	700—750	35—37	25—30
	20—25			780—800	36—38	
38—40	18—20			800—820	38—40	20—22

полуавтоматической двусторонней сварки соединений низкоуглеродистой стали на повышенных режимах в нижнем положении сварочной проволокой Св-08Г2С на токе обратной полярности даны в табл. 4.15. Режимы полуавтоматической двусторонней сварки тавровых соединений низкоуглеродистой стали сварочной проволокой Св-08Г2С на токе обратной полярности — в табл. 4.16.

Во ВНИИЭСО разработан новый способ многопроходной сварки многослойных швов плавящимся электродом,

Толщина листа, мм	Форма подготовленных кромок	Катет шва, мм	Первый		
			Номер прохода	Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, А
6—8	Без скоса кромок	4	1	1,6	300—350
		5			350—400
				2,0	400—450
10—12		6		1,6	
				2,0	500—525
14—16		8			500—550
				3,0	550—600
16—18	С двумя симметричными скосами кромок	—		2,0	450—500
20—24			1—2		500—550
26—30			1—3		450—500

Таблица 4.13

шов		Второй шов				
Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч	Номер прохода	Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч
30—32	40—45	2	1,6	300—350	30—32	45—50
32—34	40—45			350—400	32—34	40—45
34—36	45—50		2,0	400—450	34—36	45—50
	33—36		1,6			33—36
36—38	36—40		2,0	500—525	36—38	36—40
	30—33			500—550		30—33
32—34	36—40		3,0	550—600	32—34	36—40
36—38	25—30		2,0	450—500	36—38	25—30
	22—25	3—4		500—550		20—25
	26—30	4—6		450—500		26—30

Толщина листа, мм	Форма подготовленных кромок	Первый		
		Номер прохода	Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, А
1	Без скоса кромок	1	0,8	50—60
1,6				60—70
2				70—80
			1,0	90—100
3				110—120
			1,2	120—130
4			1,0	130—140
			1,2	140—150
			1,4—1,6	140—160
5			1,0	130—140
			1,2	145—155
			1,4—1,6	140—160
6			1,0	140—150
			1,2	160—170
			1,4—1,6	140—160

Таблица 4.14

шов		Второй шов				
Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч	Номер прохода	Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч
16—18	20—25	2	0,8	50—60	17—19	20—25
18—20				75—85	18—20	
				80—90		
19—21	22—24		1,0	110—120	20—22	22—24
20—22	21—23			120—130		21—23
21—23	24—26		1,2	130—140	21—23	24—26
20—22	21—23		1,0	130—150		21—23
21—23	24—26		1,2	150—160	22—24	24—26
			1,4—1,6	160—180		25—27
20—22	18—20		1,0	150—160	20—22	16—18
21—23	22—24		1,2	160—170	22—24	22—24
	23—25		1,4—1,6	160—180		24—26
	16—18		1,0	145—155	21—23	16—18
22—24	20—22		1,2	170—180		19—21
21—23	22—24		1,4—1,6	160—180	22—24	23—25

Толщина листа, мм	Форма подготовленных кромок	Первый		
		Номер прохода	Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, А
6	Без скоса кромок	1	1,2—1,6	280—300
8				300—350
10			1,2	350—380
			1,6	380—400
12			1,6	380—400
14				400—420
16			1,6—2,0	450—500
	С односторонним симметричным скосом кромок			480—500
18—20				480—500
22—24	С двумя симметричными скосами двух кромок			380—420
26		1		380—420
		2		350—400
28		1		380—420
		2		350—400
30		1		380—420
		2		350—400
32		1		380—420
		2		350—400

Таблица 4.15

шов		Второй шов				
Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч	Номер прохода	Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч
28—30	30—33	2	1,2—1,6	280—300	28—30	30—35
				300—350		
34—36	30—35		1,2	350—380	34—36	
35—37			1,6	380—400	35—37	
35—37	25—30		1,6	380—400	35—37	25—30
38—40	20—25			400—420	39—41	20—25
37—39	20—25		1,6—2,0	450—500	37—39	
	16—18					
	12—16			480—500		
36—38	14—16					18—20
36—38	14—16	3		480—500	37—39	14—16
35—37	18—22	4		350—400	36—38	18—22
36—38	14—16	3		480—500	37—39	14—16
35—37	18—20	4		350—400	36—38	18—20
36—38	12—14	3		480—500	37—39	14—16
35—37	16—18	4		350—400	36—38	15—18
36—38	12—14	3		480—500	37—39	14—16
35—37	14—16	4		350—400	36—38	

Толщина листа, мм	Форма подготовленных кромок	Первый		
		Номер прохода	Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, А
3—4	Без скоса кромок	1	0,8 1,2 1,6	160—190 190—220 220—260
6—8			1,2 1,6	320—350 350—380
12—14	С двумя симметричными скосами кромок	1—3	1,2 1,6	320—350 350—380
20—26		1—4	1,2 1,6	320—350 350—380

Таблица 4.17

Толщина свариваемых листов, мм	Ширина разделки, мм	Диаметр электродной проволоки, мм	Максимальный вылет электрода, мм	Параметры режима сварки					
				Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость подачи проволоки, м/ч	Скорость сварки, м/ч	Число проходов	Расход газа, л/ч
18 40	6—7	1,6	35 55	250—280	26—28	400—450	25—30	4—5 8—10	1200—1400
30 50		2,0 3,0	50 70	450—500 500—550	32—34 33—35	400—450 270—350		8—10	
50 100	9—10	3,0	70—120	350—600	33—36	300—350	25—35	10—12	
80 100	12—13	4,0	100—120	650—700	32—35	100—125		20—23	1400—1600

Таблица 4.16

шов		Второй шов					
Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч	Номер прохода	Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч	Катет шва, мм
20—22	16—23	2	0,8	160—190	20—22	16—20	4
21—23	23—27		1,2	190—220	21—23	23—26	
23—25	27—30		1,6	220—260	22—24	27—30	
34—36	23—26		1,2	320—350	33—35	23—26	8
36—38	26—30		1,6	350—380	36—38	26—30	
34—36	23—27	4—6	1,2	320—350	34—36	23—26	—
36—38	27—30		1,6	350—380	36—38	27—30	
34—36	23—26	5—8	1,2	320—350	34—36	23—26	
36—38	26—30		1,6	350—380	36—38	26—30	

позволяющий выполнять сварку в среде защитных газов соединений из толстолистового металла с узкой разделкой кромок без погружения в разделку токоподводящего мундштука и газового сопла. В процессе сварки от первого до последнего прохода токоподводящий мундштук и сопло горелки находятся над поверхностью свариваемого изделия на постоянном расстоянии. По мере заполнения разделки сварку выполняют с уменьшающимся вылетом электрода. При этом значение сварочного тока автоматически поддерживается постоянным. В зависимости от свариваемого металла в качестве защитного газа применяют углекислый газ и смесь его с аргоном.

При сварке стыковых соединений с узкой разделкой кромок обеспечивается повышение производительности за счет резкого уменьшения количества наплавляемого металла, снижение трудоемкости за счет устранения работы по скосу свариваемых кромок и отсутствия необходимости кантовки по сравнению с двусторонней сваркой со скосом свариваемых кромок. ВНИИЭСО совместно с заводом «Электрик» имени Н. М. Шверника разработан автомат

типа АДГ-601 для сварки стыковых соединений с узкой разделкой кромок, который выпускается промышленностью.

Ориентировочные режимы автоматической сварки в углекислом газе стыковых соединений низколегированной стали с узкой разделкой кромок проволокой марки Св-08Г2С на токе обратной полярности приведены в табл. 4.17. Для сварки в углекислом газе отечественной промышленностью серийно выпускаются автоматы АДГ-502 и следующие полуавтоматы общего назначения: ПДГ-305, ПДГ-308, ПДГ-312, ПДГ-502, ПДГ-508, ПДГ-515, ПДГ-516, ПДГ-603, А-765.

4.3. СВАРКА В СМЕСИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА С КИСЛОРОДОМ

Основой смеси активных газов является углекислый газ, в качестве дополнительного компонента в основном используется кислород. Кислород способствует увеличению степени окисления защитного газа и повышению температуры и жидкотекучести металла ванны. При его введении необходимо применять проволоку с повышенным содержанием раскислителей.

Как известно, при сварке в углекислом газе повышается разбрызгивание расплавленного металла. Брызги привариваются к основному металлу, и требуется последующая трудоемкая зачистка. Примесь кислорода к углекислому газу способствует уменьшению разбрызгивания и снижению привариваемости брызг к изделию, повышает стабильность горения дуги, улучшает формирование шва, уменьшает высоту усиления и бугристость шва. Швы имеют более плавный переход к основному металлу по сравнению со швами, выполненными в углекислом газе без кислорода. Кислород связывает водород и уменьшает его влияние на образование пор, а также снижает поверхностное натяжение сварочной ванны. При увеличении времени пребывания ванны в жидком состоянии происходит более полное удаление неметаллических включений и лучшая дегазация металла ванны.

Смесь углекислого газа с кислородом широко применяется для сварки углеродистых и низколегированных сталей с использованием проволоки марок Св-08Г2С и Св-08Г2СЦ. Проволоки содержат достаточное количество кремния и марганца для раскисления жидкой ванны и получения плотных швов.

При оптимальном составе смеси (70—80 % углекислого газа и 30—20 % кислорода) получается ровный гладкий шов, обеспечивается глубокое проплавление, увеличивается плотность шва. Увеличение содержания кислорода в смеси более 30 % приводит к появлению грубой чешуйчатости поверхности шва. При оптимальном составе смеси на поверхности шва образуется тонкий слой шлаковой корки, после удаления которой шов имеет серебристый цвет.

Сварка в смеси углекислого газа с кислородом возможна во всех пространственных положениях. Дешевизна защитного газа, минимальные затраты на внедрение и ряд положительных свойств смеси способствовали применению этого способа на заводах многих отраслей промышленности.

Кислород для сварки выпускается по ГОСТ 5583—78. Газовую смесь углекислого газа с кислородом промышленность не выпускает, поэтому смешивание газов производится непосредственно на заводах, использующих смесь для сварки. Многие заводы имеют централизованные кислородные станции, а питание сварочных постов углекислым газом осуществляется от рамп, снабжаемых газом из баллонов или изотермических систем. ВНИИавтогенмаш совместно с Институтом электросварки имени Е. О. Патона создали смесители газов типа УСД-1А и УСД-1Б, предназначенные для одновременного питания 50—70 постов смесью углекислого газа с 20—30 % кислорода. Смеситель УСД-1А оснащен газоанализатором, позволяющим автоматически вести запись состава газа. Смеситель УСД-1Б газоанализатора не имеет. Эти смесители выпускаются серийно отечественной промышленностью.

Сварка в смеси углекислого газа с кислородом производится на серийно выпускаемом оборудовании для сварки в углекислом газе. При сварке в смеси углекислого газа с кислородом на режим сварки и на перенос металла существенно влияет длина вылета электрода. Увеличение вылета электрода вызывает подогрев последнего проходящим током, повышается скорость плавления, сокращаются потери на разбрызгивание, что связано с ограничением тока короткого замыкания и сил, действующих на каплю.

При сварке в нижнем положении электродной проволокой диаметром 1,6—2,0 мм на токах 150—250 А вылет электрода можно рекомендовать до 70—80 мм, на токах

350—500 А — до 50—60 мм. При меньших токах допускается больший вылет электрода. Применение электродной проволоки диаметром 1,6—2,0 мм с увеличенным вылетом рекомендуется для сварки в нижнем положении стыковых и угловых соединений, когда требуется большой объем наплавленного металла.

Сварка проволоками диаметром 0,8—1,4 мм выполняется во всех пространственных положениях.

Технология сварки выбирается в зависимости от марки стали и требований, предъявляемых к сварным соединениям. Конструкция подготовленных под сварку кромок, типы сварных швов и их размеры при сварке в смеси углекислого газа и кислорода должны соответствовать ГОСТ 14771—76.

До сборки основной металл в местах сварки должен быть очищен от ржавчины, масла, влаги, рыхлого слоя окалины и других загрязнений. Целесообразно очищать и прилегающие к кромкам участки шириной 20—30 мм, что позволяет получить более плавный переход к основному металлу и повышенную прочность при переменных нагрузках.

Для сварки углеродистых и низколегированных сталей с обычным и увеличенным вылетом электродной проволоки необходимо применять проволоки марок Св-08Г2С по ГОСТ 2246—70 и Св-08Г2СЦ с цирконием по ТУ 14-287-19—78. Проволока Св-08Г2СЦ при увеличенном вылете обеспечивает низкий уровень разбрызгивания и слабую привариваемость брызг.

На качество сварного соединения большое влияние оказывает режим сварки. Основными параметрами режима сварки являются диаметр электродной проволоки, значение тока, напряжение дуги, скорость сварки, длина вылета электродной проволоки, состав и расход защитного газа. Режим сварки определяет форму и размеры шва, ширину зоны термического влияния, долю участия основного и электродного металла в шве, производительность процесса. При выборе режима сварки необходимо стремиться получить требуемое качество сварных соединений при максимальной производительности и минимальной стоимости процесса.

Диаметр электродной проволоки определяется толщиной металла и положением шва в пространстве. Полуавтоматическая сварка электродной проволокой диаметром 0,8—1,4 мм с обычным вылетом (примерно 10 диаметров

Таблица 4.18

Диаметр электродной проволоки, мм	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Расход газовой смеси, л/ч
0,8	50—110	15—18	300—600
1,0	50—180	17—22	
1,2	120—250	19—26	480—720
1,4	140—300	19—28	500—1000
1,6	250—350	20—30	700—1100
2,0	200—500	25—35	900—1200

проволоки) производится во всех пространственных положениях, электродной проволокой диаметром 1,2—2,0 мм с увеличенным вылетом — в нижнем положении, а также в горизонтальном положении при выполнении стыковых швов с разделкой кромок. Сварка производится постоянным током обратной полярности.

Рекомендуемые значения тока, напряжения дуги и расхода газовой смеси в зависимости от диаметра проволоки с обычным вылетом электрода приведены в табл. 4.18.

При сварке в вертикальном положении сварочный ток должен быть снижен на 15—20 %. Сварка производится более короткой дугой.

Скорость сварки обычно находится в пределах 15—80 м/ч, ее выбирают с учетом качества формирования шва и производительности процесса. С увеличением вылета электрода скорость сварки увеличивается. Сварку металла большой толщины целесообразно выполнять на большой скорости более узкими валиками. При малой скорости сварки размеры сварочной ванны увеличиваются, газовая защита ухудшается.

При многопроходной сварке отпадает необходимость в зачистке промежуточных швов, так как шлаковая корка легко переплавляется и не влияет на химический состав и механические свойства шва.

Наименьший расход газовой смеси требуется при сварке угловых швов в положении «в лодочку», наибольший — при выполнении наружных угловых соединений и соединений с отбортовкой кромок.

Основными преимуществами сварки в смеси углекислого газа с кислородом с увеличенным вылетом электрода по сравнению со сваркой в углекислом газе и обычным вылетом являются повышение производительности процесса на 20—25 %, сокращение затрат на зачистку швов от брызг, улучшение внешнего вида и качества швов.

4.4. СВАРКА В ИНЕРТНЫХ ГАЗАХ

Инертные газы аргон и гелий применяются для сварки химически активных металлов, при изготовлении конструкций из жаропрочных и коррозионных сталей, цветных металлов — алюминия, меди, титана и их сплавов, а также в случаях, когда необходимо получить сварные швы, однородные по составу с основным и присадочным металлом.

Аргон газообразный выпускается по ГОСТ 10157—79 трех сортов в зависимости от содержания примесей (азот, кислород, влага): высшего — с содержанием аргона не менее 99,99 %, первого — 99,98 %, второго — 99,95 %. Аргон высшего сорта рекомендуется для сварки активных металлов (титан, цирконий, молибден, ниобий) и их сплавов. Аргон первого сорта — для сварки сплавов на основе алюминия и магния. Аргон второго сорта — для сварки нержавеющих, углеродистых и легированных сталей.

Газообразный аргон транспортируется и хранится в стальных баллонах при давлении 14,7 МПа. Баллоны окрашены в серый цвет с надписью зелеными буквами «Аргон чистый». Он тяжелее воздуха и может накапливаться в плохо проветриваемых помещениях у пола, снижая при этом содержание кислорода в воздухе, что может вызвать кислородную недостаточность.

Гелий выпускается по ТУ 51-689—75 двух видов: гелий высокой чистоты с содержанием его не менее 99,985 % и технический с содержанием не менее 99,8 %. Гелий — бесцветный газ, без запаха, неядовит, хорошо диффундирует через твердые тела, значительно легче воздуха и аргона. Стоимость гелия примерно в шесть раз выше стоимости аргона, поэтому он применяется в основном при сварке химически чистых и активных материалов и сплавов. Газообразный гелий транспортируется и хранится в стальных баллонах при давлении 14,7 МПа. Баллоны окрашены в коричневый цвет с надписью белыми буквами «Гелий».

Для определения расхода газа применяются ротаметры типа РМ по ГОСТ 13045—81. Ротаметры имеют паспорт с приведенными в нем таблицей и градуировочным графиком расхода воздуха в литрах в час либо в кубических метрах в час. Для перевода показаний применительно к аргону или гелию необходимо значение, приведенное на графике для воздуха, умножить на коэффициент 0,85 для аргона и на 2,69 для гелия.

Аргон и гелий не растворяются в металле сварочной ванны и не образуют химических соединений с элементами, входящими в его состав. Для защиты зоны сварки применяется преимущественно аргон и реже гелий. Аргон обеспечивает высокоэффективную защиту расплавленного металла и хорошее формирование шва. Характеристики дуги в аргоне и гелии различны. При одинаковых токах напряжение дуги в гелии выше, чем в аргоне, и дуга имеет бóльшую проплавляющую спóсобность и обеспечивает более равномерное проплавление. В аргоне проплавление неравномерное: более глубокое в центре и меньшее по краям ванны.

Для соединения цветных металлов и специальных сплавов наиболее эффективна аргоногелиевая сварка. Соотношение между аргоном и гелием в смеси может быть различным. Так, при сварке в смеси 65 % аргона и 35 % гелия обеспечивается глубокое проплавление основного металла, хорошее формирование шва и снижение разбрызгивания.

При сварке в аргоне и гелии химический состав металла шва лишь незначительно изменяется вследствие испарения некоторых элементов. Однако в металле шва часто наблюдаются поры, вызываемые загрязнением. Во избежание этого необходимо следить за чистотой электродной проволоки и места сварки основного металла. Свариваемые кромки и прилегающие к ним участки поверхности шириной 20—25 мм должны быть тщательно очищены от загрязнений.

Сварка в инертных газах, так же как и сварка в углекислом газе и смесях активных газов, может производиться во всех пространственных положениях. При сварке в вертикальном, горизонтальном и потолочном положениях используется электродная проволока диаметром 1,2 мм, при автоматической и полуавтоматической сварке в нижнем положении — проволока диаметром 1,2—3,0 мм.

Сварка углеродистых и легированных сталей. Сварка низкоуглеродистых и низколегированных сталей в инертном газе применяется редко, так как эти стали хорошо свариваются под флюсом и в углекислом газе, и лишь в исключительных случаях, когда требуется получение швов высокого качества, используется инертный газ.

При применении чистого аргона для сварки конструкционных сталей соединения характеризуются недостаточной стабильностью и неудовлетворительным формированием шва. Добавка к аргону небольшого количества кислорода или углекислого газа существенно повышает устойчивость горения дуги и улучшает формирование шва. Растворяясь в жидком металле и скапливаясь преимущественно на поверхности, кислород значительно снижает его поверхностное натяжение. Поэтому для сварки сталей применяют не чистый аргон, а смеси с кислородом или углекислым газом.

Высокие технологические свойства при сварке сталей обеспечиваются при добавке к аргону до 1—5 % кислорода. При применении кислорода понижается критический ток, при котором капельный перенос переходит в струйный; дуга горит стабильно, обеспечивая сварку небольших толщин. Кислород способствует увеличению плотности металла шва, улучшению сплавления, уменьшению подрезов и увеличению производительности процесса сварки. Кислород снижает содержание углерода в металле шва до более низкого уровня. Избыток кислорода в защитном газе приводит к образованию пор в металле шва.

Для сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей может также применяться аргон с добавкой 10—20 % углекислого газа. Углекислый газ способствует устранению пористости в швах и улучшению формирования шва.

Высоколегированные стали успешно свариваются в инертных газах и их смесях. При этом обеспечивается высокая стабильность дуги и минимальный угар легирующих элементов. Химический состав металла шва регулируется за счет применения проволоки нужного состава. При сварке легированных сталей обычно применяется электродная проволока такого же химического состава, как и основной металл. Выбор состава смеси зависит от состава стали и степени ее легирования. Стали, которые содержат в своем составе элементы с высокой активностью к кислороду (алюминий, титан, цирконий и т. п.), сва-

Таблица 4.19

Толщина металла, мм	Способ сварки	Число проходов	Диаметр электродной проволоки, мм	Сварочный ток, А	Скорость сварки, м/ч	Расход газа, л/мин
4	Полуавтоматическая	1	1,0—1,6	180—300	—	7—10
8		2	1,6—2,0	240—360		10—15
5	Автоматическая	1	1,0	260—300	30—40	8—9
10		2	2,0	320—400	20—30	12—18

риваются в атмосфере инертных газов (аргон, гелий). Режимы для сварки высоколегированных сталей различных толщин выбираются опытным путем. Ориентировочные режимы автоматической и полуавтоматической сварки стыковых соединений толщиной 4—10 мм на постоянном токе обратной полярности приведены в табл. 4.19.

Сварка меди. Сварка меди затруднена вследствие интенсивного окисления ее в нагретом и расплавленном состоянии, большой жидкотекучести и высокой теплопроводности.

Медь хорошо сваривается в аргоне, гелии и азоте, а также в смеси аргона с гелием или азотом. Азот по отношению к меди является нейтральным газом. С целью экономии аргона и повышения производительности целесообразно использовать смесь аргона с азотом (70—80 % аргона и 30—20 % азота). Азот способствует увеличению глубины проплавления меди. Наилучшее формирование швов получается при сварке в аргоне и гелии.

Из-за высокой теплопроводности меди для получения надежного провара в начале сварки и хорошего сплавления по кромкам детали подогреваются до 200—500 °С. При сварке в аргоне подогрев необходим при толщине меди более 4 мм, а в азоте — более 8 мм.

Сварка меди выполняется на постоянном токе обратной полярности. При применении импульсно-дуговой сварки в аргоне возможна сварка меди во всех пространственных положениях, а также сварка тонкого металла.

Таблица 4.20

Толщина металла, мм	Диаметр электродной проволоки, мм	Защитный газ	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч	Расход газа, л/мин
1,0	0,8—1,2	Аргон Азот	80—110	18—20	30—45	7—9
2—3	0,8—1,6 0,8—1,2	Аргон Азот	140—210 140—200	19—23 20—25	25—35	8—10
5—6	1,0—1,6 1,0—1,4	Аргон Азот	250—320	23—26 24—27	20—25	10—12
8,0	2,0—3,0	Аргон	350—550	32—37	18—22	14—18
	1,6—3,0	Гелий	300—500	32—38		30—40
12,0	2,0—4,0	Аргон	350—650		18	14—18
		Гелий	350—620	34—42		30—45
12—14		Аргон	300—500	28—36	16—18	14—18
	1,5—3,0	Гелий	270—500	32—38	18—22	30—40
		Азот	280—500	32—39		14—16
16—20	2,0—4,0	Аргон	350—680		16—18	14—18
		Гелий Азот	350—650	34—42 35—42	16—20	30—50 14—18

Для сварки меди могут быть использованы серийно выпускаемые автоматы и полуавтоматы, предназначенные для сварки сталей в защитных газах.

Некоторые режимы сварки стыковых соединений меди в нижнем положении приведены в табл. 4.20.

Сварка алюминия. Сварка алюминия возможна в аргоне либо в смеси аргона и до 70 % гелия на постоянном токе обратной полярности. Для сварки обычно используется стандартное оборудование.

Таблица 4.21

Толщина металла, мм	Тип разделки	Число проходов	Диаметр электродной проволоки, мм	Первый проход			Последующие проходы		
				Сила тока, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч	Сила тока, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч
10	Без разделки	2	2,0	250—300	22—24	20—25	370—390	28—30	20
15	V-образная	4			24—26				
25		8	2,5	400—440	26—28	40—45	400—440	27—29	15—20
40	X-образная	20	2,0	280	25—27	35	370—390		27
50		15	2,5	400	24—26	16	420—440	26—28	23

Трудность сварки алюминия и его сплавов заключается в наличии на их поверхности тугоплавкой окисной пленки, которая препятствует сплавлению металла сварочной ванны с основным металлом и, оставаясь в шве, образует неметаллические включения. Окисная пленка в процессе сварки удаляется в результате действия тока при горении дуги. При сварке на токе обратной полярности ток «очищает» поверхность металла от окисной пленки на протяжении всего процесса горения дуги. Однако действием тока может быть разрушена лишь сравнительно тонкая пленка окиси. Толстую пленку окиси алюминия необходимо перед сваркой удалить механическим или химическим путем.

В инертных газах алюминий и его сплавы свариваются электродной проволокой, по составу близкой к основному металлу. Ориентировочные режимы сварки в аргоне алюминиевого сплава АМг толщиной 10—50 мм приведены в табл. 4.21. Расход аргона 15—20 л/мин.

При использовании газовой смеси из 30 % аргона и 70 % гелия обеспечивается более глубокое проплавление и возможна сварка за один проход алюминия толщиной

Таблица 4.22

Толщина металла, мм	Тип соединения	Диаметр электродной проволоки, мм	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч
16	Одностороннее без скоса кромок	2,5—3,0	450—500	27—32	12—22
	Двустороннее без скоса кромок		380—430	28—32	
22		3,0	420—470	30—33	12—18
30	Двустороннее с Х-образной разделкой кромок	4,0	480—530	33—35	12—16

Таблица 4.23

Тип соединения	Толщина металла, мм	Диаметр электродной проволоки, мм	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч	Расход аргона, л/мин	Частота импульсов, Гц
Стыковое одностороннее с обратным формированием шва на стальной подкладке	2 3	1,6	50—65 80—100	15—17 16—18	20—30	7—8 8—10	50
	4		130—150	18—20	20—25	10—12	
	5		140—170				
	6		160—190	19—21		12—14	
Стыковое двустороннее без разделки кромок		2,0	140—160	18—20	20—30		
	8		160—180	22—24	25—30		100
	10		220—280	24—26		14—16	

до 16 мм, а за два прохода — толщиной до 30 мм. Ориентировочные режимы сварки стыковых соединений алюминия в этой смеси приведены в табл. 4.22. Расход аргона 15—20 л/мин, гелия 30—40 л/мин.

Для соединения алюминия большое применение нашел способ импульсно-дуговой сварки. Наложение импульса на основной сварочный ток сокращает промежуток времени пребывания капли на торце электрода и позволяет осуществлять устойчивый процесс при относительно малом значении среднего тока. При этом способе облегчается сварка в различных пространственных положениях и несколько повышаются механические свойства соединения.

Режимы полуавтоматической импульсно-дуговой сварки в аргоне алюминия толщиной 2—10 мм в нижнем положении приведены в табл. 4.23.

Сварка титана. Титан обладает высокой прочностью при температуре до 500 °С, высокой коррозионной стойкостью во многих агрессивных средах, малой плотностью, он широко применяется в промышленности.

При сварке требуется защита от воздуха не только расплавленного металла, но и участков твердого металла, нагретого до температуры выше 400 °С. Обычно это достигается применением специальных приставок длиной до 500 мм и подачей газа с обратной стороны шва через

Таблица 4.24

Толщина металла, мм	Диаметр электродной проволоки, мм	Защитный газ	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч	Расход газа, л/мин
3	1,5	Смесь гелия и 20 % аргона	200—220	20—25	22	35—40
6	2,0		300—330	22—27	20	
6—8		Аргон Гелий	320—380 320—360	29—31 38—40	22—25 20—25	50—100 100—200
15—20	3—4 3,0	Аргон Гелий	600—800 600—700	31—34 44—48	18—20	70—120 100—200

специальные подкладки. Защита считается надежной, если после сварки поверхность металла имеет блестящий вид.

Для сварки применяется электродная проволока, близкая по составу к основному металлу. Сварка производится на постоянном токе обратной полярности. Перед сваркой кромки и прилегающие к ним поверхности, а также электродную проволоку тщательно очищают механическим путем или травлением. При сварке используется аргон только высшего сорта или гелий высокой чистоты. При сварке в аргоне швы получаются более узкими, чем в гелии. При сварке в гелии швы — более широкие, с плавным переходом к основному металлу.

При модернизации серийного оборудования, предназначенного для сварки сталей, следует учесть необходимость повышения скорости подачи электродной проволоки примерно до 2500—3000 м/ч.

Режимы сварки в аргоне и гелии стыковых соединений титана в нижнем положении приведены в табл. 4.24.

4.5. СВАРКА ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ

В Советском Союзе разработано около 50 марок порошковой проволоки различного назначения. Порошковая проволока позволяет создавать газовую и шлаковую защиту металла сварочной ванны от воздуха, производить легирование металла шва и его очистку от вредных примесей. Наиболее широко порошковая проволока применяется для сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей, а также для наплавочных работ, что обусловлено возможностью варьирования химического состава и массы порошковой шихты, обеспечивающих высокое качество сварного соединения. Использование порошковой проволоки имеет большие производственные преимущества, особенно в монтажных условиях. Этому способствует отсутствие газовой аппаратуры (баллоны, шланги, газовые редукторы), флюса и флюсовой аппаратуры, усложняющих процесс сварки или повышающих его трудоемкость (засыпка флюса, его уборка и др.).

Порошковая проволока представляет собой стальную, медную, никелевую, кобальтовую или другую металлическую оболочку, заполненную порошкообразным веществом — смесью газообразующих и шлакообразующих материалов, ферросплавов и металлических порошков.

Эффект защиты расплавленного металла от воздуха зависит от состава и количества защитных материалов порошка — наполнителя проволоки и режима сварки. Изменение состава порошка позволяет воздействовать на химический состав шва и технологические характеристики дуги. Отношение массы порошка к массе проволоки называется коэффициентом заполнения, зависит от типа конструкции, назначения проволоки и обычно составляет 15—45 %.

Порошковые проволоки различаются по назначению, способу защиты металла и составу порошкового наполнителя.

По способу защиты порошковые проволоки делятся на самозащитные (защита расплавленного металла осуществляется с помощью материалов порошка — наполнителя проволоки) и используемые с дополнительной защитой зоны сварки газом или флюсами. Наиболее часто в качестве защитной среды применяется углекислый газ. Использование углекислого газа для дополнительной защиты зоны дуги в сочетании с активным воздействием на металлургические процессы подбором композиции шлака позволяет достигать весьма высокого качества металла шва и сварного соединения.

Использование шихтовых сердечников различных составов дает возможность в широких пределах изменять характер металлургического воздействия, регулировать сварочно-технологические характеристики и показатели механических свойств металла шва. Сварочные шлаки, образующиеся при плавлении рутиловых порошковых проволок, способствуют получению швов хорошей формы, с отличным внешним видом при сварке в широком диапазоне токов и скоростей и в различных пространственных положениях.

Отличительными особенностями процесса сварки порошковой проволокой в углекислом газе являются высокая стабильность горения дуги, равномерное плавление проволоки, незначительное разбрызгивание металла, отличный внешний вид швов, высокие механические свойства металла шва и сварного соединения. Это способствует эффективному применению порошковой проволоки при изготовлении металлоконструкций различного назначения и особенно таких, к внешнему виду которых предъявляются повышенные требования.

Порошковые проволоки для сварки в углекислом газе не содержат газообразующих материалов. Основные со-

ставляющие порошка — наполнителя проволоки — шлакообразующие материалы. При плавлении таких проволок составляющие порошка-наполнителя стабилизируют дугу, образуя шлаки, способствующие хорошему формированию металла шва. Поверхность швов покрыта тонкой коркой шлака, которая надежно защищает металл от образования на его поверхности окисной пленки. Порошковые проволоки для сварки в углекислом газе могут успешно применяться взамен проволок сплошного сечения для сварки высокопрочных сталей. Они позволяют повысить производительность и улучшить характеристики металла шва. При использовании порошковых проволок производительность повышается на 10—15 % по сравнению с проволокой Св-08Г2С.

Для сварки в углекислом газе разработано 10 марок порошковой проволоки диаметром 2—3 мм по ТУ 14-4-1059—80, ТУ 14-4-604—75, ТУ 180—78 ИЭС, ТУ 181—78 ИЭС, ТУ 204—79 ИЭС и др. Для наплавки износостойких поверхностей разработан также ряд марок порошковых проволок.

По ГОСТ 2246—70 предусмотрена поставка более 40 марок высоколегированной сварочной проволоки сплошного сечения, пригодной для наплавочных работ. Изготовление такой проволоки — дорогой и сложный процесс, связанный с большой затратой средств и времени. Поэтому износостойкую наплавку поверхностей целесообразно выполнять порошковой проволокой. Технология производства порошковых проволок для сварки и наплавки практически одинакова. Коэффициент заполнения наплавочных порошковых проволок обычно не превышает 45 %. Для полуавтоматической наплавки используется проволока диаметром 2,6—3,2 мм, а для автоматической под флюсом — диаметром 3,6 мм.

Сварка самозащитной порошковой проволокой является весьма перспективным способом. Самозащитная порошковая проволока содержит в значительно большем количестве компоненты, защищающие расплавленный металл от вредного воздействия воздуха, чем проволока, используемая с дополнительной защитой газом.

Разработано большое число марок самозащитных проволок. Проволоки, предназначенные для сварки низкоуглеродистых сталей, например ПП-АН1, ПП-1ДСК, содержат порошок-наполнитель, состоящий в основном из рутила органического и алюмосиликатов (полевой шпат,

Таблица 4.25

Марка проволоки	Тип порошка-наполнителя	Диаметр проволоки, мм	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В
ПП-АН1	Рутилорга-нический	2,8	200—350	24—28
ПП-1ДСК		2,4	180—320	24—32
ПП-АН3	Карбонатно-флюоритовый	3,0	350—500	25—30
ПП-АН7		2,0; 2,3	160—300	20—26
ПП-АН11		2,0; 2,4	150—300	
ППВ-5		2,3	100—400	20—32
СП-2		2,3; 2,5	280—500	26—34
ПП-2ДСК	Флюоритовый	2,3	340—450	25—32

гранит, слюда и др.). В качестве раскислителей используется ферромарганец, а в качестве газообразующих — крахмал, целлюлоза. Наплавленный металл по химическому составу близок к кипящей или полуспокойной низкоуглеродистой стали. Проволоки рутилорганического типа обладают удовлетворительными сварочно-технологическими свойствами и при сварке в широком диапазоне напряжений дуги обеспечивают получение плотных швов.

Для сварки ответственных конструкций из низкоуглеродистых и низколегированных сталей предназначены порошковые проволоки карбонатно-флюоритного типа, например ПП-АН3, СП-2. Шлакообразную часть порошка-наполнителя этих проволок составляют флюоритовый и рутиловый концентраты. В качестве газообразующих материалов использованы карбонаты кальция, магния и натрия. Раскислителями служат ферромарганец, ферросилиций, ферротитан и ферроалюминий. Эти проволоки допускают применение большой плотности тока. Наплавленный металл по составу представляет собой кремнемарганцовую сталь.

Рекомендуемые режимы сварки в нижнем положении самозащитными порошковыми проволоками, нашедшими промышленное применение, приведены в табл. 4.25.

Сварка порошковой проволокой выполняется преимущественно шланговыми полуавтоматами с источниками питания дуги постоянного тока с жесткими характеристиками. Специализированные полуавтоматы, предназначенные для сварки порошковой проволокой (А-765, ПДГ-603), имеют механизмы подачи с двумя парами роликов. Это обеспечивает надежную транспортировку проволоки по шлангу без существенной деформации. При использовании неспециализированных полуавтоматов или автоматов требуется учесть необходимость модернизации механизма подачи проволоки.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ДЛЯ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

5.1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОСОБЕННОСТИ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ (ИДСП)

При сварке плавящимся электродом основными силами, воздействующими на каплю электродного металла, являются электродинамическая сила $F_{эд}$, сила поверхностного натяжения $F_{п.н}$, реактивная сила $F_р$ и сила тяжести $F_т$.

Электродинамическая сила возникает в результате радиального сжатия капли электромагнитным полем, образуемым сварочным током. По мере оплавления капли, когда ее диаметр становится больше диаметра шейки, соединяющей каплю с электродом, сила $F_{эд}$ начинает действовать вдоль оси электрода по направлению к сварочной ванне и способствует отделению капли. Сила поверхностного натяжения $F_{п.н}$ вызвана молекулярным сцеплением капли с электродом и препятствует отделению капли. Реактивная сила $F_р$ возникает в результате реакции испарения металла капли и также препятствует ее отделению. Сила тяжести $F_т$ в зависимости от пространственного положения сварного шва либо способствует (нижнее положение), либо препятствует (потолочное по-

ложение) отделению капли. Сила $F_т$ начинает проявляться только при крупнокапельном переносе металла, который не нашел практического применения; поэтому в дальнейшем сила $F_т$ не будет приниматься во внимание.

По характеру горения дуги различают сварку при непрерывном горении дуги, сварку с периодическими короткими замыканиями дугового промежутка и сварку с периодическими обрывами тока. Последний вид сварки практического применения не нашел. Сварка при непрерывном горении дуги возможна лишь в том случае, когда сила $F_{эд}$ существенно превышает силу $F_р$, т. е. в аргоне и смесях аргона с кислородом и углекислым газом, если содержание углекислого газа в смеси не превышает 25 %. При сварке в углекислом газе сила $F_р$ больше силы $F_{эд}$, поэтому перенос металла возможен лишь в моменты коротких замыканий, когда сила $F_р$ резко уменьшается. Сила $F_{эд}$ пропорциональна квадрату тока, а сила $F_{п.н}$ уменьшается по мере оплавления капли и увеличения радиуса ее кривизны (или диаметра), поэтому сварка при непрерывном горении дуги с мелкокапельным переносом возможна при достаточно больших токах. Такой перенос металла называют струйным. При снижении тока, когда он становится ниже критического $I_{кр}$, струйный перенос переходит в крупнокапельный, что значительно снижает качество сварных соединений. Сварка с короткими замыканиями возможна как на больших, так и на малых токах, а в качестве защитной среды может применяться как аргон, так и углекислый газ. Однако перенос металла при сварке с короткими замыканиями характеризуется значительным разбрызгиванием и несплавлениями. При сварке прочных материалов места несплавлений часто становятся очагами зарождения трещин, поэтому сварка с короткими замыканиями не находит применения для конструкций ответственного назначения.

Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом применяется в подавляющем большинстве случаев при непрерывном горении дуги, поэтому в качестве защитной среды используются аргон и аргоноокислительные смеси. В среде углекислого газа ИДСП не нашла применения. При ИДСП на постоянный (базовый) ток, который может быть очень небольшим, периодически накладываются импульсы тока с частотой в несколько десятков герц, при которых сила $F_{эд}$ становится преобладающей, что вызы-

вает отделение капли. При ИДСП происходит управляемый перенос металла с частотой переноса, равной (или кратной) частоте импульсов, в то время как среднее значение тока может быть небольшим и значительно меньшим критического. По сравнению со сваркой неплавящимся электродом ИДСП позволяет в 3—8 раз повысить производительность труда и значительно снизить сварочные деформации при практически одинаковом качестве сварных соединений. ИДСП может применяться для конструкций ответственного назначения из различных марок сталей, алюминиевых, медных, никелевых сплавов и титана толщиной 1 мм и более при выполнении швов во всех пространственных положениях.

5.2. ТРЕБОВАНИЯ К ИСТОЧНИКАМ ПИТАНИЯ ДЛЯ ИДСП

На рис. 5.1 изображена кривая тока при ИДСП. Импульсно-дуговую сварку плавящимся электродом характеризуют следующие основные параметры:

$I_б$ — базовый ток, постоянный ток со сравнительно небольшой степенью пульсации (рис. 5.1);

$I_и$ — импульсный ток, среднее значение тока, превышающего базовый ток (заштрихованные участки на рис. 5.1);

$I_{кр}$ — уровень тока, ниже которого без наложения импульсов перенос металла становится крупнокапельным (рис. 5.1);

τ — время переноса, промежуток времени, в течение которого ток (или импульс тока) больше критического (рис. 5.1);

$I_{им}$ — амплитуда импульсов тока (рис. 5.1);

$t_и$ — длительность импульсов тока (рис. 5.1);

A — энергия импульса, определяющая скорость капли после ее сброса;

T — период следования импульсов (рис. 5.1);

f — частота импульсов;

I — сварочный ток (рис. 5.1), среднее значение тока, достаточно полно характеризующее мощность дуги: $I = I_б + I_и$.

Основным параметром, определяющим скорость капли после ее сброса, является энергия импульса. По мере оплавления капли диаметр ее увеличивается. Если диаметр капли превышает диаметр шейки, соединяющей ее

с электродом, то с момента, когда электродинамическая сила $F_{эд}$, возникающая во время импульса, становится преобладающей, начинается движение капли в направлении сварочной ванны; при этом капля продолжает удерживаться на конце электрода. Иными словами, капля вытягивается в направлении изделия, а диаметр шейки уменьшается. По мере уменьшения тока импульса с момента, когда сила $F_{эд}$ перестает быть преобладающей ($F_{эд} < F_{п.\,н} + F_{р}$), скорость перемещения центра тяжести капли начинает снижаться; однако за счет запасенной кинетической энергии капля продолжает перемещаться в прежнем направлении до момента обрыва шейки. После сброса капля движется с неизменной скоростью через дуговой промежуток и попадает в сварочную ванну. Рассмотренный режим переноса является оптимальным.

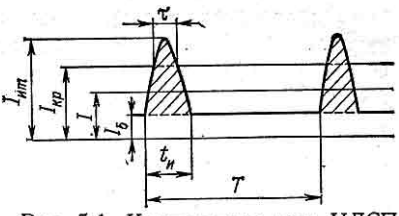


Рис. 5.1. Кривая тока при ИДСП

При завышенной энергии импульса капля отделяется от конца электрода раньше, чем сила $F_{эд}$ становится меньше силы удержания $F_{у}$ ($F_{у} = F_{п.\,н} + F_{р}$); при этом капли имеют чрезмерно большую скорость, что вызывает выплескивание сварочной ванны, сопровождаемое сильным разбрызгиванием. При заниженной энергии импульса скорость капли снижается до нуля раньше, чем происходит обрыв шейки; капля вновь притягивается к концу электрода. Скорость капли к моменту наступления равенства сил $F_{эд}$ и $F_{у}$ равна

$$v = \frac{\int_{0}^{\tau} (F_{эд} - F_{у})\, dt}{m},$$

где m — масса капли; τ — время, в течение которого $F_{эд} > F_{у}$.

Энергия импульса определяет скорость капли и приблизительно равна

$$A \approx k \int_{0}^{\tau} (i^2 - I_{кр}^2)\, dt,$$

где i — мгновенное значение тока; k — коэффициент пропорциональности.

Коэффициент k и, следовательно, необходимая энергия импульса A увеличиваются при увеличении диаметра электрода и содержания углекислого газа в смеси аргона и углекислого газа. Для сталей коэффициент k больше, чем для алюминиевых сплавов. Из выражения для энергии импульса следует, что ее можно регулировать путем изменения импульсного тока или длительности импульсов, а также изменением одновременно обеих величин; причем благодаря интегральной зависимости энергии от тока форма кривой импульса не имеет существенного значения.

Другим важным параметром импульсов является их частота. При неизменной скорости подачи электродной проволоки масса капель увеличивается пропорционально периоду T. Для получения капель одинакового размера необходимо изменять частоту импульсов пропорционально скорости подачи. Однако при мелкокапельном и среднекапельном переносе, когда размер капель значительно меньше объема сварочной ванны, частота импульсов мало влияет на формирование шва, глубину и форму проплавления; поэтому частоту импульсов в достаточно большом диапазоне изменения сварочного тока можно оставлять неизменной и применять от двух до четырех ступеней частоты для полного диапазона регулирования тока.

Третьим параметром импульсов тока является их крутизна, т. е. отношение их амплитуды к длительности. Так как энергия импульсов находится в квадратичной зависимости от тока, с увеличением крутизны импульсов при одной и той же энергии A происходит уменьшение импульсного тока и, следовательно, нижнего предела сварочного тока. Импульсы тока при фазовом регулировании определяются импульсами напряжения $U_{и}$, формируемыми из синусоидального напряжения сети (рис. 5.2), сопротивлением дуги, а также активным сопротивлением и индуктивностью сварочного кабеля.

Оптимальное напряжение холостого хода $U_{х.х}$ сварочного трансформатора, который служит для формирования импульсов, лежит в пределах 40—150 В. При $U_{х.х}$ менее 40 В значительно повышается нижний предел сварочного тока. При $U_{х.х}$ свыше 150 В возникают технические трудности с формированием импульсов, в то время как нижний предел сварочного тока уменьшается незначительно. На практике в подавляющем большинстве случаев применяют пологие импульсы напряжения, т. е.

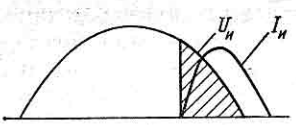


Рис. 5.2. Импульсы тока и напряжения

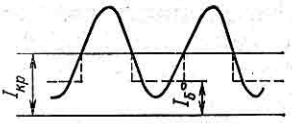


Рис. 5.3. Форма сварочного тока с неявно выраженным базовым током

импульсы небольшой крутизны ($U_{х.\,х} = 40 \ldots 60$ В). Необходимость применения импульсов большой крутизны ($U_{х.\,х} = 100 \ldots 150$ В) возникает редко, в основном при использовании сварочного кабеля с большой индуктивностью. Из изложенного следует, что при формировании импульсов можно с успехом применять фазовое тиристорное регулирование энергии импульсов одновременно за счет изменения их амплитуды и длительности, а частоту импульсов изменять дискретно и кратно двойной частоте сети. На практике чаще всего применяют частоты импульсов 50 и 100 Гц, реже $33^1/_3$ и 25 Гц, так как последние неблагоприятно влияют на зрение сварщика.

При протекании базового тока происходит только оплавление конца электрода, поэтому пульсация базового тока не имеет существенного значения. Имеются источники питания, формирующие сварочный ток с неявно выраженным базовым током (рис. 5.3), например импульсный источник ИУП-1, разработанный ИЭС имени Е. О. Патона. В этом случае часть кривой тока, лежащую выше уровня критического тока $I_{кр}$, можно рассматривать как импульс тока, а часть кривой ниже уровня $I_{кр}$ — как среднее значение базового тока $I_б$.

Для предотвращения обрывов дуги, когда базовый ток вследствие пульсации снижается до нуля, желательно либо применять в схемах нелинейные сглаживающие дроссели, индуктивность которых растет при уменьшении тока, либо маломощную схему подпитки.

При сварке плавящимся электродом в защитных газах, в том числе и при ИДСП, применяют преимущественно независимую подачу проволоки. При сварке больших толщин оплавление конца электродной проволоки происходит как при базовом, так и при импульсном токе. Поэтому вольт-амперные характеристики (ВАХ) по базовому и импульсному току (базовые и импульсные ВАХ) должны быть жесткими — с наклоном 0,01—0,03 В/А,

что способствует саморегулированию длины дуги. При сварке малых толщин базовый ток настолько незначителен, что служит лишь для поддержания горения дуги в промежутке между импульсами, а оплавление электрода и сброс капли происходят во время импульса. Для предотвращения обрывов базового тока необходима его стабилизация путем применения крутопадающих базовых ВАХ — с наклоном 0,5—1,5 В/А при сохранении импульсных ВАХ жесткими. При сварке на средних токах желательно применять пологопадающие базовые ВАХ — с наклоном 0,1—0,2 В/А.

При ИДСП на больших токах основная доля приходится на базовый ток. По мере снижения сварочного тока и скорости подачи проволоки (при неизменной частоте импульсов) размер капель уменьшается. При этом растет сила $F_{п.н}$, что затрудняет перенос капель электродного металла, в то время как уменьшение массы и инерционности капель облегчает их перенос; поэтому необходимая энергия импульсов и, следовательно, значение импульсного тока существенных изменений не претерпевают и уменьшение сварочного тока происходит практически только за счет уменьшения базового тока. Если дальнейшее уменьшение базового тока невозможно, необходимо перейти на меньшую частоту импульсов, что позволяет уменьшить импульсный ток $I_и$ с сохранением энергии импульсов A.

В заключение можно сделать следующие выводы:

изменять энергию импульсов можно фазовым тиристорным регулированием;

можно использовать для всего диапазона тока две частоты: 50 и 100 Гц, изменяемые ступенчато; меньшие частоты используются для меньших токов;

напряжение холостого хода силового импульсного трансформатора должно быть равно 40—60 В, в отдельных случаях желательно повысить его до 100—150 В;

регулирование сварочного тока осуществляется в основном за счет изменения базового тока;

пульсация базового тока не имеет существенного значения;

базовые вольт-амперные характеристики должны быть крутопадающими при малых токах, пологопадающими — при средних и жесткими — при больших токах. Импульсные ВАХ должны быть жесткими.

5.3. СПОСОБЫ ФОРМИРОВАНИЯ ТОКА ПРИ ИДСП

Из многочисленных возможных способов формирования тока для ИДСП [5, 6] наиболее предпочтительными являются способ параллельного включения источника постоянного тока и генератора импульсов и способ шунтирования сглаживающего дросселя. При способе параллельного включения (рис. 5.4) дуга питается базовым током $I_б$ (рис. 5.5) от источника постоянного тока *G1* и импульсами тока $I_и$ от генератора импульсов *G2*.

Преимуществом этого способа является возможность использования достаточно простого генератора импульсов совместно с серийно выпускаемыми источниками постоянного тока. Недостаток способа — коммутация базового тока, т. е. его снижение после окончания импульса до недопустимо малого значения, что часто приводит к обрывам дуги. Коммутация связана с тем, что во время импульса напряжение генератора импульсов превышает напряжение источника постоянного тока и базовый ток уменьшается (штриховая линия на рис. 5.5). Коммутация может быть уменьшена, если последовательно с дугой включить нелинейный дроссель, имеющий большую индуктивность при малых токах, что вызывает уменьшение крутизны импульсов и увеличение нижнего предела сварочного тока. Явление коммутации особенно усугубляется при тиристорном регулировании тока источника постоянного тока, поэтому на практике используется в основном регулирование отпайками силового трансформатора, что не позволяет, однако, осуществлять стабилизацию базового напряжения при колебаниях напряжения сети и регулирование наклона базовых ВАХ. Способ параллельного включения нашел применение в отечественной практике, при этом в качестве источников постоянного тока используют серийно выпускаемые выпрямители или вра-

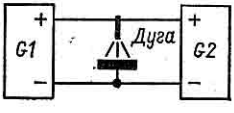


Рис. 5.4. Схема параллельного включения источников постоянного тока и генератора импульсов

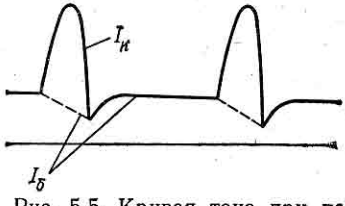


Рис. 5.5. Кривая тока при параллельном включении источников

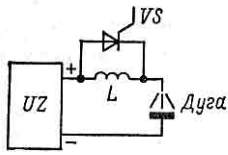


Рис. 5.6. Схема формирования тока шунтированием дросселя

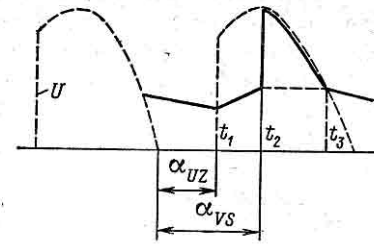


Рис. 5.7. Кривая напряжения U, сформированного тиристорным регулятором

щающиеся преобразователи, работающие совместно с генераторами импульсов ГИД-1 или ГИ-ИДС.

Другой способ формирования тока — шунтированием сглаживающего дросселя — поясняется схемой, изображенной на рис. 5.6. Силовая часть источника питания включает в себя тиристорный регулятор *UZ*, сглаживающий дроссель *L* и тиристор *VS*, формирующий импульсы. Тиристорный регулятор формирует пульсирующее напряжение, периодически снижающееся до нуля или до уровня, который меньше потенциала горения дуги. В простейшем случае регулятор *UZ* состоит из однофазного сварочного трансформатора и двухполупериодного тиристорного выпрямителя. Кривая напряжения *U* для этого случая изображена на рис. 5.7 (штриховая линия). Среднее значение напряжения определяется углом включения α_{VZ} тиристоров регулятора.

С момента t_1 начинается нарастание сварочного тока, сглаженного дросселем *L*. В момент t_2 включается импульсный тиристор *VS* и напряжение *U* в виде импульса прикладывается непосредственно к сварочной дуге. Через тиристор *VS* протекают два встречных (контурных) тока: прямой ток импульса и обратный ток, запасенный дросселем *L*. Пока прямой ток больше обратного, ток тиристора равен их разности и тиристор открыт. По мере уменьшения напряжения *U* импульс тока снижается. Пока тиристор открыт, ток дросселя (или базовый ток) определяется следующим выражением:

$$i_б = i_{б0}e^{-t/\tau} + \frac{U_{VS}}{R}(1 - e^{-t/\tau}),$$

где $\tau = L/R$ — постоянная времени; *L* — индуктивность дросселя *L*; *R* — активное сопротивление катушки дрос-

селя; $i_{б0}$ — ток дросселя в момент времени t_2; U_{VS} — падение напряжения на открытом тиристоре VS.

Поскольку величина R мала (и, следовательно, велика постоянная времени τ), а также ввиду того, что падение напряжения на тиристоре U_{VS} также мало и не превышает 1—1,5 В, базовый ток за время импульса практически не успевает измениться и остается на уровне $i_{б0}$. В момент t_3, когда импульсный ток снижается до уровня неизменяющегося базового тока, тиристор VS закрывается, импульс затухает и дуга питается базовым током за счет энергии, запасенной дросселем. Таким образом, на участке t_1—t_2 базовый ток нарастает и одновременно запасается энергия дросселя. На участке t_2—t_3 базовый ток остается неизменным и энергия дросселя сохраняется, т. е. не расходуется. С момента t_3 до момента появления очередного участка синусоидального напряжения на выходе регулятора UZ базовый ток снижается и энергия дросселя отдается в сварочную цепь. Так как среднее напряжение дросселя в установившемся режиме равно нулю, напряжение дуги равно напряжению на выходе регулятора UZ и регулируется посредством изменения угла α_{UZ}. При изменении угла включения α_{VS} происходит перераспределение значений базового и импульсного напряжений (токов) при неизменном напряжении дуги. Рассмотренный способ шунтирования дросселя имеет следующие преимущества перед способом параллельного включения:

наличие только одного источника (источника постоянного тока со сглаживающим дросселем) и использование импульсного тиристора вместо генератора импульсов существенно снижают массу, габариты и стоимость источника питания;

отсутствует коммутация базового тока благодаря тому, что дроссель во время импульса зашунтирован;

имеется возможность стабилизации базового напряжения и изменения наклона базовых ВАХ благодаря наличию тиристорного регулятора UZ.

Шунтирование дросселя можно осуществлять совместно и поочередно в каждый полупериод с одним из двух вентилей регулятора UZ, что позволяет разгрузить указанные вентили от импульсного тока. Рассмотренный способ реализован в серийно выпускаемых отечественных импульсных выпрямителях ВДГИ-301.

Наименование оборудования	Тип оборудования	Номинальный сварочный ток, А	Пределы регулирования сварочного тока, А	Номинальное напряжение дуги, В	Частота импульсов, Гц
Генераторы импульсные	ГИД-1 ГИ-ИДС	—	—	—	50 и 100
Выпрямители импульсные	ВДГИ-301	315	40—315	30	
Полуавтоматы	ПДИ-303		—	—	—

5.4. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИДСП

К отечественному оборудованию для ИДСП относятся генераторы импульсов ГИД-1 и ГИ-ИДС, импульсные выпрямители ИУП-1, ВДГИ-301 и полуавтомат ПДИ-303.

Генератор ГИД-1 основан на принципе фазового регулирования энергии импульсов. Тиристоры включены в цепь первичной обмотки силового трансформатора. Имеются три ступени крутизны импульсов, изменяющейся путем введения в силовую цепь той или иной индуктивности.

Генератор ГИ-ИДС основан также на принципе фазового регулирования энергии импульсов; тиристоры включены в цепь вторичной обмотки силового трансформатора.

Выпрямитель ИУП-1 представляет собой выпрямитель постоянного тока с большим коэффициентом пульсации (см. рис. 5.3), имеет тиристоры на стороне вторичной обмотки силового трансформатора с плавным регулированием напряжения дуги. Изменение напряжения холостого хода силового трансформатора и индуктивности сварочной цепи ступенчатое.

Выпрямитель ВДГИ-301 работает на принципе шунтирования дросселя, имеет тиристоры на стороне первичной обмотки силового трансформатора. В выпрямителе предусмотрены крутые и пологие импульсы с частотой 50 и 100 Гц, стабилизация базового и импульсного напряжений и три ступени наклона базовых ВАХ — крутопадающие, пологопадающие и жесткие.

Таблица 5.1

Максимальная амплитуда импульсов, А	Пределы регулирования длительности импульсов, мс	Пределы регулирования базового тока, А	ПВ, %	Пределы регулирования скорости подачи проволоки, м/ч	Масса, кг
1200	0—5	—	—	—	140
—	—				
1000	1—4	10—200	60		290
—	—	—	—	72—960	13

Полуавтомат ПДИ-303 состоит из механизма подачи, комплекта горелок и шлангов и выносного пульта, комплектуется выпрямителем ВДГИ-301, предназначен для сварки алюминиевых сплавов, снабжен пластмассовым направляющим каналом, медно-графитовыми наконечниками, правильным устройством. На выносном пульте можно предварительно установить два независимых сварочных режима, которые могут переключаться тумблером как перед сваркой, так и в процессе сварки.

В табл. 5.1 приведены основные параметры некоторых типов оборудования для ИДСП.

5.5. ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКОЙ И АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИДСП

Свариваемые и сварочные материалы. Подготовка изделий под сварку. ИДСП может применяться для сварки самых разнообразных материалов, таких, как высокопрочные, нержавеющие, жаропрочные, углеродистые стали, алюминиевые, медные, никелевые сплавы, титан и др. Наибольшее распространение ИДПС получила для сварки алюминиевых сплавов толщиной 1,5 мм и более и специальных сталей толщиной 1 мм и более. Сварка углеродистых сталей производится преимущественно на постоянном токе без наложения импульсов в углекислом газе, так как стоимость углекислого газа значительно меньше стоимости аргона. При сварке конструкций ответственного назначения, когда недопустимы несплавления и раз-

Таблица 5.2

Марка свариваемого сплава	Универсальная сварочная проволока, обеспечивающая удовлетворительное соединение	Проволока, обеспечивающая удовлетворительные основные характеристики соединения и повышенные (на 5—10 %) показатели			
		Стойкость против горячих трещин	Прочность	Пластичность	Коррозионная стойкость
А99 А97 А95	СвА99	А99	СвА85Т	А99	А99
А85	СвА85Т	СвА85Т	1437	СвА000	1437
АД0 АД1	СвА1	СвА1	СвА1	СвА000	СвА85Т
АМцС АМг3 АМг5 АМг6 АМг61	СвАМц СвМг3 СвАМг5 СвАМг6 СвАМг61	СвАМц СвАМг5 СвАМг6Цч СвАМг6Цч СвАМг6Цч	СвАМц СвАМг5 СвАМг6 СвАМг61 СвАМг61	СвАМц АВч СвАМг5 СвАМг6Цч СвАМг6Цч	СвАМц АВч Св1557 Св1557 СвАМг5
АВ АД31 АД33	СвАК5	СвАК5	Св1557	Св1557	АВч
1915 1201	Св1557 Св1201Пч	СвАМг5 Св1201Пч	СвАМг6 Св1201Пч	СвАМг6 Св1201Пч	Св1557 Св1201Пч

брызгивание и стоимость работ по устранению этих дефектов значительно превышает разность стоимости аргона и углекислого газа, ИДСП находит применение и для сварки углеродистых сталей в аргоно-окислительных смесях.

В настоящее время ИДСП широко используется для сварки конструкций из различных марок алюминиевых сплавов. Рекомендуемые [18] марки проволок для сварки сплавов различных марок приведены в табл. 5.2.

При сварке алюминиевых сплавов различных марок между собой наиболее существенное значение приобретает стойкость сварного соединения против образования горячих трещин. Рекомендуемые для этого случая марки сварочной проволоки приведены в табл. 5.3.

При сварке алюминиевых сплавов применяется проволока диаметром 1,2—2 мм. В качестве защитного газа используется аргон высшего или первого сорта по ГОСТ 10157—79. При сварке больших толщин, когда требуется глубокое проплавление, может применяться гелий высшей чистоты или смесь аргона с гелием. Перед

Таблица 5.3

Свариваемый металл	Марка проволоки для сварки со сплавами										
	1201	1915	АД33	АД31	АВ	АМг6	АМг5	АМг3	АМцС	АД0	АД00
А99	СвАК5	СвАК5	СвАК5	СвАК5	СвАК5	СвАМг6	СвАМг5	СвАМг5	СвАМц	СвА1	СвА85Т
АД00											
АД0											
АМцС	Св1201Пч	СвАМг5	СвАМг5	СвАМг5	СвАМг5						
АМг3	СвАК5										
АМг5			СвАМг6	СвАМг6	СвАМг6						
АМг6		СвАМг6									
АВ			СвАК5	СвАК5							
АД31											
АД33											
1915											

сваркой кромки деталей и прилегающие к ним участки шириной не менее 40 мм должны быть обезжирены ацетоном, этиловым спиртом или водными растворами ОП-7 и ОП-10, после чего кромки и прилегающие к ним участки шириной 15—25 мм зачищаются щеткой с проволокой из коррозионной стали диаметром не более 0,15 мм. Щетки периодически нужно очищать. Продолжительность между зачисткой и сваркой не должна превышать трех суток. Сварочная проволока должна быть очищена химическим способом в такой последовательности [18]:

удаление консервирующей смазки промывкой горячей водой или растворителями (ацетон, уайт-спирит);

травление проволоки в течение 5—20 мин в растворе состава: едкий натр 8—12 г/л, кальцинированная сода 40—50 г/л, тринатрийфосфат 40—50 г/л;

промывка в горячей воде при температуре не ниже 50 °С;

промывка в холодной проточной воде;

осветление в растворе, состоящем из хромового ангидрида (100 г/л) и серной кислоты плотностью 1,84 г/см^3 (10 мг/л) при температуре 15—25 °С. Осветление производится до исчезновения темного налета;

промывка в холодной проточной воде;

промывка в горячей проточной воде при температуре не ниже 50 °С;

сушка при температуре 60—80 °С до полного удаления влаги.

Срок хранения готовой к сварке проволоки не должен превышать одних суток.

Для нержавеющих сталей типа Х18Н9Т применяется проволока Св-04Х19Н9Т, Св-06Х19Н9Т, Св-04Х19Н11М3 по ГОСТ 2246—70. Диаметр проволоки 1—2 мм. В качестве защитного газа используется аргон. В некоторых случаях для лучшего растекания металла может быть применена смесь аргона с 2—5 % кислорода.

Для высокопрочных сталей типа 15Х2Н3МФД используется или аустенитная, например Св-10Х19Н11М4Ф, или среднелегированная проволока типа Св-07ХСН3МД. Диаметр проволоки 1—2 мм. В качестве защитного газа можно использовать аргон. Однако при сварке в аргоне получается провар язычковой формы, который бывает не всегда желательным. Для улучшения формы провара в качестве защитной среды рекомендуется использовать смесь аргона с 18—20 % углекислого газа. Содержание углекислого газа в смеси не должно быть более 25 %, так как в про-

тивном случае мелкокапельный импульсный перенос металла становится невозможным.

Выбор сварочных режимов. Для каждого сварочного тока должна быть выбрана оптимальная частоты и энергия импульсов. Частоту 50 Гц следует применять при малых токах, когда использование частоты 100 Гц невозможно. При токах свыше 70—100 А следует применять частоту 100 Гц, так как при частоте 50 Гц увеличивается чешуйчатость шва, его пористость и дымообразование. При слишком заниженной энергии импульсов наблюдается крупнокапельный перенос, при слишком завышенной — сильное разбрызгивание, выплескивание сварочной ванны, неустойчивость дуги. Для оптимальной энергии импульсов характерны монотонное гудение дуги, стабильность процесса, мелкокапельный перенос металла и почти полное отсутствие разбрызгивания.

В табл. 5.4 приведены рекомендуемые режимы для ИДСП алюминиевых сплавов [30], а в табл. 5.5 — ориентировочные режимы для ИДСП хромоникелевых сталей типа 18/8 в аргоне [31].

Техника сварки. Техника полуавтоматической ИДСП легко осваивается сварщиком. Сварка производится углом вперед. В начале шва скорость сварки должна быть несколько меньшей, чем при установлении режима, что увеличивает провар в начале шва; если есть такая возможность, рекомендуется начинать сварку с приварки технологической планки. Перед окончанием сварки для предотвращения образования кратера следует останавливать горелку и несколько углублять дугу, а затем совершать небольшое возвратное движение. При этом кратер выводится на ранее заваренный шов.

Техника ИДСП в нижнем положении ничем не отличается от техники обычной полуавтоматической сварки плавящимся электродом.

Сварка угловых и нахлесточных швов на металле одинаковой толщины производится электродом, направленным в середину угла, образуемого свариваемыми кромками. При сварке изделий из металла различной толщины электрод следует направлять в сторону более толстого металла.

Необходимо следить, чтобы металл шва получался по возможности блестящим, а темный налет откладывался по обе стороны от шва. Это обычно принимается за признак качественного соединения.

Таблица 5.4

Тип соединения	Толщина свариваемых изделий, мм	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Частота импульсов, Гц	Диаметр проволоки, мм	Расход аргона, л/мин	Число проходов	Условное обозначение шва
Стыковое с зазором 0—0,5 мм	2	60—80	17—18	50	1,2	7—9	2	С3, С7
	3	90—120	18—19		1,2—1,6	8—10		
Стыковое с зазором 0—1 мм	4	130—160	19—21			10—12		
	6	160—190	20—22		1,6	13—14		
Стыковое с односторонней V-образной разделкой кромок	6	130—160	19—21	100	1,6	10—12		С21
	8	170—200	20—22		1,6—2,0	13—14		
	10—12	220—280			2,0		3	
Стыковое с двусторонней Х-образной разделкой кромок	14—16	240—280	22—24		2,0—2,5	14—16	4	С24
	18—20	250—300					4—6	

Продолжение табл. 5.4

Тип соединения	Толщина свариваемых изделий, мм	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Частота импульсов, Гц	Диаметр проволоки, мм	Расход аргона, л/мин	Число проходов	Условное обозначение шва
Тавровое без скоса кромок	2	90—120	18—19	100	1,2—1,6	8—9	2	Т3
	3	130—160	19—20			9—11		
	4	150—180	20—21		1,6	10—12		
	6—8	190—240	21—22		1,6—2,0	12—14	2—4	
	10—12	230—280	21—23		2,0	1—16		
Тавровое с двусторонним скосом кромок	6—8	190—240	21—22		1,6—2	12—14		Т10
	10—12	230—280	21—23		2—2,5	12—15		
	14—16	260—300	22—24			14—18	4—6	
	18—20					14—20	6—8	
Угловое	3	80—100	18—19		1,2—1,6	8—9	2	У3
	4	100—140	19—20		1,6	9—10		
	6—8	160—220	19—21			10—12		
	10—12	220—260	21—22		1,6—2,0	12—14	2—4	
	14—16	240—280	21—23		2,0	13—15	3—5	
	18—20				2—2,5		4—6	

Таблица 5.5

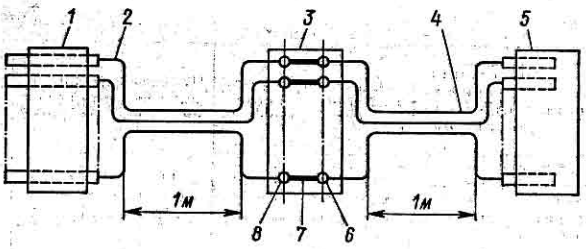
Тип соединения	Толщина свариваемых изделий, мм	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Частота импульсов, Гц	Диаметр проволоки, мм	Расход аргона, л/мин
Стыковое и тавровое без разделки кромок	1,0—1,2 1,5—2,0 3,0—4,0	50—70 65—130 90—170	18—19 18—20 20—23	50 50—100 100	1,0—1,2 1,0—1,4 1,2—1,6	9—11 10—12 12—16
Стыковое с V-образной разделкой, тавровое без разделки кромок	5,0—8,0	160—300	22—28	100	1,6—2,0	15—20

Стыковые швы в нижнем положении рекомендуется сваривать за один проход с применением подкладок из нержавеющей стали с формирующей канавкой. При сварке на весу с двух сторон перед наложением подварочного шва корень основного шва должен быть тщательно вырублен.

Сварка вертикальных швов производится снизу вверх. Сварку стальных конструкций толщиной до 2 мм можно выполнять сверху вниз. При сварке алюминиевых сплавов толщиной свыше 4 мм рекомендуется совершать поперечные колебания электродом. Угол наклона выдерживается в пределах 70—75° по отношению к направлению сварки. При уменьшении угла наклона повышается усиление шва и переход от шва к основному металлу получается менее плавным. Чрезмерное увеличение угла наклона приводит к выдуванию сварочной ванны давлением дуги и повышенному разбрызгиванию. С увеличением скорости сварки угол наклона надо увеличивать.

5.6. ВЫПРЯМИТЕЛЬ ВДГИ-301. ОПЫТ НАЛАДКИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ

Среди различных типов оборудования для ИДСП наиболее распространенными являются полуавтомат ПДИ-303 и выпрямитель ВДГИ-301, входящий в состав полуавтомата. Выпрямитель может быть использован для ИДСП в других дуговых полуавтоматах, поэтому вопросы, связанные с его эксплуатацией в производственных условиях, нуждаются в более детальном рассмотрении, тем более, что



Тип шланга	Тип вилки	Тип гнезда	Число электрических цепей
ШП1	РШАВ-20	РШАГ-20	20
ШП2	МРН-22		22

Рис. 5.8. Шланги с контактными панелями

уже накоплен достаточный опыт эксплуатации. Выпрямители являются значительно более сложными источниками питания, чем серийно выпускаемые в настоящее время источники постоянного тока, и если наладка выпрямителей ВДГИ-301 на заводе-изготовителе производится на специализированных стендах, то у потребителей отсутствие таких стендов создает значительные трудности по наладке. Кроме того, большое число параметров, характерных для ИДСП, и отсутствие у сварщиков достаточных навыков по реализации импульсно-дугового процесса существенно сдерживают внедрение выпрямителей ВДГИ-301.

Ниже излагаются практические приемы наладки выпрямителей с помощью простых средств, доступных большинству потребителей, а также выбора оптимальных сварочных режимов. Основные параметры выпрямителя и описание работы его схемы не приводятся, поскольку эти вопросы подробно отражены в паспорте.

Проверка выпрямителя на работоспособность. В процессе проверки определяются основные характеристики выпрямителя. Выпрямитель, выдержавший проверку, пригоден к сварке. Оборудование, необходимое для проверки: балластный реостат на ток 300 А при напряжении 30 В, вольтамперметр (тестер), амперметр с шунтом на ток 200—300 А, электронный осциллограф, пригодный для измерения постоянной составляющей (например, С1-19А или

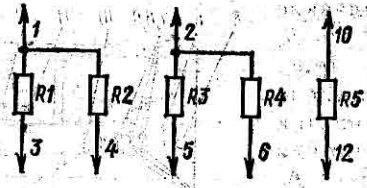


Рис. 5.9. Блок проверки поджигающих импульсов
$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = 510$ Ом; 2 Вт

С1-19Б, С1-70 и др.), шланг с контактной панелью ШП1 или ШП2 (рис. 5.8).

Шланг с контактной панелью состоит из вилки *1*, гнезда *5*, контактной панели *3* и соединительных проводов *2* и *4*. Одноименные контакты вилки и гнезда соединены проводом через соответствующую пару штырей *6* или *8* и перемычек *7*. При необходимости можно разорвать любой провод, отпаять нужную перемычку и подсоединить осциллограф к разорванной цепи как со стороны вилки через штырь первого ряда *8*, так и со стороны гнезда через штырь второго ряда *6*. Жгут проводов во избежание их спутывания необходимо обмотать изоляционной лентой, а концы кос механически закрепить в разъемах и на контактной панели. Расстояние между штырями должно быть достаточным для подсоединения зажимов «крокодил» без замыкания соседних штырей.

Кроме того, в оборудование, необходимое для проверки, входят блок проверки поджигающих импульсов (рис. 5.9), резисторы которого укреплены на изолирующей панели и соединены с вилкой разъема РШАВ-14 (контакты разъема на рис. 5.9 обозначены цифрами), а также индикатор настройки фильтра (рис. 5.10).

Проверка сопротивления изоляции. Проверка изоляции осуществляется омметром.

Отсоединить от выпрямителя первичные и вторичные силовые концы.



Рис. 5.10. Индикатор настройки фильтра
$R = 1 \ldots 15$ кОм; 0,5 Вт; *VD* — диод типа Д220, Д226, Д312 и др. с допустимым обратным напряжением 50 В и допустимым прямым током 50 мА

Проверить плавкие предохранители *22*, *7—9*, *2—4* (*FU1—FU7*) (рис. 5.11). Предохранитель *FU1* должен быть на ток 5 А, предохранители *FU2—FU4* — на 3—5 А, *FU5—FU7* — на 1—3 А.

Включить защитный автомат *Q1*, установить переключатель *10* (*SA2*) влево, вывернуть предохранитель *7* (*FU2*) (правый в нижнем ряду).

Измерить сопротивление между первичными зажимами. Сопротивление не должно быть менее 150 кОм.

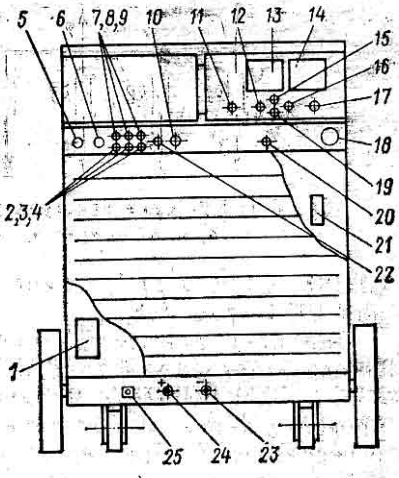


Рис. 5.11. Передняя стенка выпрямителя ВДГИ-301

Установить переключатель *10* (*SA2*) вправо, ввернуть предохранитель *7* (*FU2*), снять переднюю жалюзийную решетку, измерить сопротивление между первичными и вторичными силовыми зажимами и корпусом, а также между первичными зажимами при нажатом якоре пускателя *1* (*KM-1*). Сопротивление не должно быть менее 2,5 МОм. Измерить сопротивление между контактами *3* и *5* разъема *25* (*XS2*). Сопротивление не должно быть менее 100 кОм.

Установить переключатели *10* и *20* (*SA2* и *SA4*) влево.

Проверка пусковой аппаратуры.

Отсоединить разъем поджигания тиристоров (рис. 5.11).

При включенном защитном автомате, левом положении переключателя *20* (*SA4*), ручек потенциометров *12* и *16* (*R121* и *R122*), расположенных на лицевой панели *14* (рис. 5.12), при положении *11* переключателя *11* (*SA3*) и разомкнутых контактах *3* и *5* разъема *25* (*XS2*) подать на входные зажимы выпрямителя сетевое напряжение. На панели управления должна загореться сигнальная лампочка *1* (*HL*) (рис. 5.12).

Проверить напряжение на первичных зажимах всех фаз.

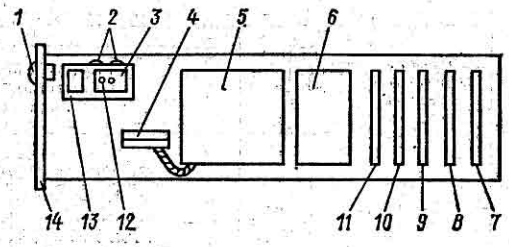


Рис. 5.12. Блок управления (вид сверху)

Включить вентилятор кнопкой «Пуск» *5* (*SB1*) (рис. 5.11). Воздух должен выбрасываться через заднюю жалюзийную решетку. В противном случае необходимо отключить сетевое напряжение, нажав кнопку «Стоп» *6*, разрядить конденсаторы защиты от радиопомех путем замыкания первичных зажимов, поменять местами два любых сетевых конца, подать на вход выпрямителя сетевое напряжение и нажать кнопку *5* (*SB1*). Напряжение на выходных зажимах выпрямителя не должно быть более 4 В.

Проверка и настройка фильтра.

Выключить автомат *Q1*, индикатор настройки фильтра (рис. 5.10) подсоединить к точкам *1* и *2* схемы ВДГИ-301 (диод *VD* — к точке *1*, резистор *R* — к точке *2*), один конец осциллографа подсоединить к точке соединения диода *VD* с резистором *R*, а другой — к точке *4* схемы ВДГИ-301. Точки *2* и *4* расположены на входных зажимах *2* фильтра *13*, а точки *1* и *2* — на сигнальной лампочке *HL* (рис. 5.12).

Включить автомат *Q1*. При расстроенном фильтре на экране осциллографа будет наблюдаться кривая, изображенная на рис. 5.13, *а* и *б*, при настроенном фильтре — кривая, изображенная на рис. 5.13, *в*. Настройка фильтра осуществляется вращением крайнего винта *12* на дросселе фильтра *3* (рис. 5.12). После настройки головку винта *12* залить краской.

Включить автомат *Q1*.

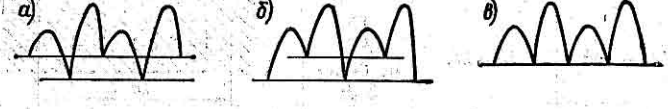


Рис. 5.13. Кривые напряжения при настройке фильтра

Таблица 5.6

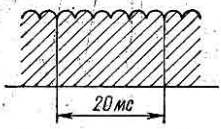
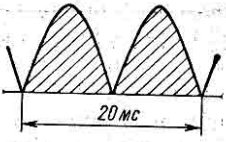
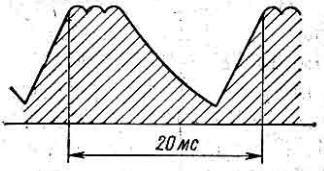
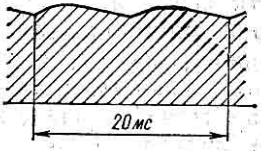
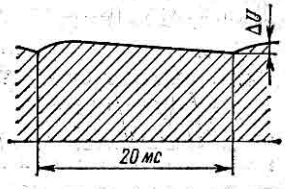
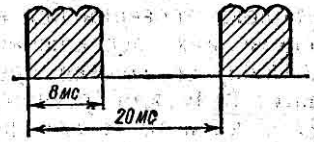
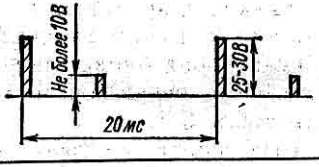
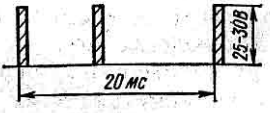
Точки схемы ВДГИ-301	Номера контактов разъема	Среднее напряжение, В	Форма кривой напряжения
83—59 *59—76*	*2—1* *1—11*	14	
82—59 *59—78*	*13—1* *1—12*	6,8 24	Стабилизированное напряжение
59—138	*1—19*	12	
91—6 *93—5*	*4—14* *6—16*	20	
95—62	*8—18* Контакты *8*, *18* зашунтировать сопротивлением 2—10 кОм (МЛТ-0,5)	28	
92—91 *94—93*	*15—4* *17—6*		
121—143	*10—20*	65 ΔU не более 5 В	

Таблица 5.7

Сигнал на резисторах	Положение переключателя *SA3*	Форма и величина импульса
R1 *R4*	*1—11*	
R2	*1, 3, 5, 6, 8, 10*	
R2 *R3*	*2, 4, 7, 9, 11*	Не более 3 В (амплитудное значение)
R5	*1—5*	
	6—11	

Проверка питания схемы управления.

Установить переключатель *11* (*SA3*) в положение *2*; выдвинуть блок управления настолько, чтобы можно было в рассечку разъема блока питания *4* (рис. 5.12) включить шланг ШП1 (рис. 5.8); установить ручки потенциометров *R121* и *R122* влево.

Включить выпрямитель и проверить выходные напряжения блока питания *5* (рис. 5.12) в соответствии с табл. 5.6. Первая точка схемы и первый контакт разъема каждого выхода соответствуют знаку «плюс».

Выключить автомат *Q1*.

Проверка выходных сигналов блока управления.

Подключить разъем поджигания тиристоров (рис. 5.11) к блоку проверки поджигающих импульсов (рис. 5.9).

Контакты *3* и *5* разъема *25* (*XS2*) должны быть разомкнуты. Включить автомат *Q1*. Сигнал на резисторах *R1*—*R4* блока проверки при всех положениях переключателя *11* (*SA3*) не должен превышать 3 В для резисторов *R1* и *R4* и 10 В для резисторов *R2* и *R3*.

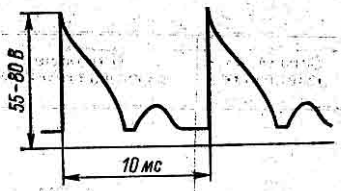


Рис. 5.14. Выходное напряжение выпрямителя на холостом ходу

Замкнуть контакты *3* и *5* разъема *25* (*XS2*) (рис. 5.11), установить ручку потенциометра *R122* вправо. Сигналы на резисторах блока проверки (рис. 5.9) в зависимости от положения переключателя *11* (*SA3*) должны соответствовать табл. 5.7.

Выключить автомат *Q1*; отсоединить шланг ШП1 (рис. 5.8) и блок проверки поджигающих импульсов (рис. 5.9); включить разъем блока питания и поджигания тиристоров; закрыть переднюю жалюзийную решетку; установить переключатель *11* (*SA3*) в положение *11*. Включить выпрямитель на холостом ходу. Напряжение на выходе при левом положении ручки потенциометра *R121* должно быть равно 18—24 В, а форма — соответствовать рис. 5.14.

Проверка максимальных параметров и наклона внешних характеристик.

При положении *11* переключателя *SA3* установить ручку потенциометра *R122* влево, подключить к выходным зажимам выпрямителя *23*, *24* (рис. 5.11) балластный реостат, последовательно с реостатом включить амперметр с шунтом на 300 А. Гнезда *3* и *5* разъема *25* (*XS2*) должны быть замкнуты.

Включить выпрямитель. Установить при помощи потенциометра *R121* и реостата напряжение на выходных зажимах выпрямителя 30 В при токе нагрузки 180—200 А. Измерить выходное напряжение выпрямителя на каждой ступени переключателя *11* (*SA3*), переводя его

Таблица 5.8

Положение переключателя *SA3*	*11*	*10*	*9*	*8*	*7*	*6*	*5*	*4*	*3*	*2*	*1*
Выходное напряжение выпрямителя, В	30		16		10		30	16		10	

Таблица 5.9

Положение переключателя *SA3*	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*
Амплитуда напряжения на реостате, В	110	62	110	62	110	110	62	110	62	110	62
Частота импульсов, Гц	50					110					

под нагрузкой из положения *11* в положение *1*. Значения напряжений должны соответствовать табл. 5.8 с отклонениями не более ±15 %.

Проверка импульсного напряжения.

При положении *1* переключателя *11* (*SA3*), не меняя положения ручки потенциометра *R121*, установить с помощью балластного реостата выходное напряжение 16—18 В. Ток нагрузки должен быть равен 16—19 А. Установить ручку потенциометра *R122* вправо.

Измерить амплитуду напряжения и частоту импульсов на каждой ступени переключателя *11* (*SA3*), переводя его из положения *1* в положение *11*. Эти величины должны соответствовать табл. 5.9 с отклонениями по амплитуде не более чем на ±15 %. Измерение амплитуды осуществляется непосредственно на зажимах балластного реостата при помощи осциллографа. Соседние импульсы по амплитуде не должны отличаться друг от друга более чем на 10 %.

Определение пульсации базового тока.

Установить ручку потенциометра *R122* влево.

При положении *11* переключателя *SA3* установить с помощью потенциометра *R121* и реостата напряжение на выходе выпрямителя 14 В при токе 10—18 А. Амплитуда напряжения не должна быть более 19 В.

Примечание. При отсоединенных управляющих электродах тиристоров *VS2* и *VS3* амплитуда напряжения при положениях *1*, *3*, *5*, *6*, *8* и *10* переключателя *SA3* должна быть равна 40—50 В вместо значения 110 В, указанного в табл. 5.9.

Проверка дистанционного управления.

Снять нагрузку, разомкнуть гнезда *3* и *5* разъема *XS2*, установить ручки потенциометров *R121* и *R122* и переключатель *SA4* вправо. Сигналы задания по среднему и импульсному напряжениям должны быть равны

нулю, напряжение между контактами *5* и *6* разъема *SX2* должно быть равно нулю, сопротивление между этими контактами — 75 Ом.

Замкнуть контакты *11* и *12* разъема *XS2*. Сигнал задания по среднему напряжению при переключении переключателя *SA4* не должен изменяться.

Разомкнуть контакты *11* и *12* и замкнуть контакты *8* и *11* разъема *XS2*. Сигнал задания по импульсному напряжению при переключении переключателя *SA4* не должен изменяться.

Разомкнуть контакты *8* и *11*, установить ручки потенциометров *R121* и *R122* и переключатель *SA4* влево, выключить защитный автомат.

Примечание. Сигналы задания измеряются микроамперметром *13* (*PA1*) при нижнем положении переключателя *15* (*SA6*). Для измерения сигналов задания по среднему или импульсному напряжению переключатель *19* (*SA7*) переключается соответственно влево или вправо (рис. 5.11).

Проверка блока питания полуавтомата (осуществляется при работе выпрямителя ВДГИ-301) с полуавтоматом ПДИ-303).

Включить защитный автомат *Q1*. При разомкнутых гнездах *3* и *5* разъема *XS2* и снятой нагрузке выпрямителя выходное напряжение последнего не должно превышать 4 В, а при замыкании контактов *15* и *16* разъема *X1* должно повышаться до 18—48 В (в зависимости от положения ручки потенциометра *R121*).

При правом положении переключателя *SA2* на контактах *1*, *3* и *8*, *9* разъема *X1* должно быть переменное напряжение соответственно 65 и 54 В. При левом положении переключателя *SA2* эти напряжения должны отсутствовать.

Примечание. Разъем *X1* расположен слева от вентилятора за передней жалюзийной решеткой и служит для присоединения полуавтомата ПДИ-303.

Настройка измерительных цепей. Оборудование, необходимое для настройки: балластный реостат на ток 300 А, напряжение 30 В, тестер, амперметр с шунтом на ток 200—300 А.

Настройка осуществляется после проверки выпрямителя на работоспособность и лишь применительно к измерительным цепям. Отсутствие настройки сказывается только на правильности показаний приборов, но не отражается на работоспособности выпрямителя и его выходных

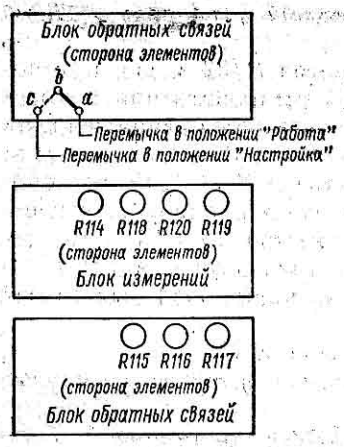


Рис. 5.15. Настроечные элементы

параметрах. Перед настройкой перемычка на контактных стойках блока обратных связей *8* (рис. 5.12) устанавливается в положение «Настройка» (рис. 5.15).

Настройка цепи измерения выходного напряжения.

Установить переключатель *SA3* в положение *11*, замкнуть гнезда *3* и *5* разъема *XS2*, включить выпрямитель на холостом ходу, установить при помощи потенциометра *R121* напряжение на выходных зажимах выпрямителя *20 В*. Ток микроамперметра *PA1* должен быть равен 20 мкА. Подстройка тока осуществляется потенциометром *R114* (рис. 5.15) на блоке измерений *7* (рис. 5.12).

Настройка цепи измерения среднего и базового тока.

Установить ручку потенциометра *R122* влево, установить при помощи балластного реостата и потенциометра *R121* ток нагрузки 100 А при напряжении на выходе выпрямителя 12—18 В, установить переключатель *17* (*SA5*) влево; ток микроамперметра *14* (*PA2*) должен быть равен 40 мкА (рис. 5.11). Подстройка тока осуществляется потенциометром *R118* (рис. 5.15) на блоке измерений.

Установить переключатель *17* (*SA5*) в среднее положение (рис. 5.11). Ток микроамперметра *PA2* должен быть равен 20 мкА. Подстройка тока осуществляется потенциометром *R119* (рис. 5.15) на блоке измерений.

Настройка цепи измерения амплитуды импульсов тока.

Установить при помощи потенциометра *R121* и балластного реостата напряжение на зажимах балластного реостата 20 В при токе 120—180 А, а при помощи потенциометра *R122* — амплитуду импульсов напряжения 40 В. Установить переключатель *SA5* вправо. Ток микроамперметра *PA2* должен быть равен $0{,}2I$ (в микроамперах), где I — ток нагрузки в амперах. Подстройка тока микроамперметра осуществляется потенциометром *R120* (рис. 5.15) на блоке измерений.

Настройка цепи предварительной установки среднего напряжения.

Установить ручку потенциометра *R122* влево, при положении *11* переключателя *SA3* установить при помощи потенциометра *R121* и балластного реостата напряжение на выходных зажимах выпрямителя 20 В при токе нагрузки 15—25 А. Разомкнуть гнезда разъема *XS2*. При левом положении переключателя *SA7* и нижнем положении переключателя *SA6* ток микроамперметра *13* (*PA1*) должен быть равен 20 мкА. Подстройка тока осуществляется потенциометром *R115* (рис. 5.15) на блоке обратных связей (рис. 5.12).

Замкнуть гнезда *3* и *5* разъема *XS2*.

Настройка цепи предварительной установки импульсного напряжения.

Установить переключатель *SA3* в положение *7*. Установить ручку потенциометра *R122* вправо. При помощи потенциометра *R121* и балластного реостата установить напряжение на выходе выпрямителя 16,1—16,3 В при токе нагрузки 10—25 А.

При помощи потенциометра *R122* установить выходное напряжение 16 В. При правом положении переключателя *SA7* и нижнем положении переключателя *SA6* ток микроамперметра *PA1* должен быть равен 80 мкА. Подстройка тока осуществляется при помощи потенциометра *R116* (рис. 5.15) на блоке обратных связей.

Повторить операцию настройки цепи предварительной установки импульсного напряжения, как указывалось выше, но переключатель *SA3* установить в положение *6*. Подстройка осуществляется потенциометром *R117* (рис. 5.15) на блоке обратных связей. Управляющие электроды тиристоров *VS2* и *VS3* должны быть подсоединены к проводам *39* и *44*.

Выключить автомат *Q1*; установить перемычку на блоке обратных связей (рис. 5.15) в положение «Работа»; залить краской оси подстроечных потенциометров; закрыть печатные платы кожухом; закрыть выпрямитель.

Рекомендации по наладке. Перед наладкой выпрямителя необходимо подробно ознакомиться с работой схемы по паспорту. Для наладки, кроме оборудования, необходимого для проверки на работоспособность, может потребоваться принципиальная схема, комплект монтажных схем и шланг ШП2 (рис. 5.8).

Если выпрямитель не выдержал испытаний на работоспособность, предварительно определяется место неисправности логическим путем по совокупности и характеру отклонений тех или иных параметров от указанных в методике проверки. После этого осуществляется поиск неисправности по сигналам на разъемах блоков при помощи приведенных ниже таблиц, для чего нужный блок выносится из корпуса выпрямителя ВДГИ-301 и соединяется с последним через шланг. Если при включении выпрямителя ВДГИ-301 на холостом ходу наблюдаются неполадки в работе силовой части схемы (периодические броски первичного тока, которые сопровождаются дерганием первичных проводов и боковых стенок выпрямителя, отключением защитного автомата *Q1*, нагревом обмоток силового трансформатора и т. д.), необходимо отключить разъем поджигания тиристоров *21* (*X4*) (рис. 5.11). Если броски тока не прекратятся, надо отпаять провода трансформатора от управляющих электродов тиристоров. Тиристоры в цепи первичной обмотки трансформатора работают только попарно, поэтому, отсоединив, например, управляющий электрод тиристора *VS1* (точка *35* на схеме ВДГИ-301), необходимо отсоединить электрод *SV4* (точка *49*), а отсоединив электрод *VS2* (точка *39*), надо отсоединить электрод *VS3* (точка *44*). Если и это не поможет, следует проверить монтаж силовой части, а также тиристоры *VS1—VS4*. При работе с отключенными тиристорами необходимо переставить перемычку на контактных стойках блока обратных связей (рис. 5.12) в положение «Настройка» (рис. 5.15). Следует иметь в виду, что напряжение будет регулироваться потенциометром *R121* только при малых углах поворота его ручки. При измерении сигналов маломощных цепей рекомендуется конец осциллографа, связанный с его корпусом, подсоединить к точке цепи, которая связана с какой-либо точкой питающей цепи

Таблица 5.10

Номера контактов разъема блока питания	*11—1*	*1—19* *8—18* *15—4* *17—6*	*10—20*
Шунтирующее сопротивление	100—200 Ом 2 Вт	2—10 кОм 0,5 Вт	5—20 кОм 0,5 Вт

либо непосредственно, либо через конденсатор или низкоомный резистор. Расположение блоков указано на рис. 5.12. На однополярных сигналах первая цифра провода или контакта разъема в приведенных таблицах относится к знаку «плюс».

Блок питания. Осциллограммы выходного напряжения блока питания приведены в табл. 5.6. Для проверки блока питания *5* при отключении его выходного разъема (рис. 5.12) от схемы управления, т. е. на холостом ходу, необходимо подсоединить к выходам блока питания резисторы в соответствии с табл. 5.10.

Блок синхронизации. Входные и выходные сигналы блока синхронизации *11* (рис. 5.12) приведены в табл. 5.11. При замкнутых гнездах *3* и *5* разъема *25* (*XS2*) (рис. 5.11) сигналы на входах и выходах блока должны соответствовать табл. 5.11.

При положении перемычки в блоке обратных связей «Настройка» (рис. 5.12 и 5.15) время *t* сигнала на выходах схемы *19—9* и *19—5* регулируется при помощи потенциометра *R121* (рис. 5.11) в пределах 0—8 мс. При положении перемычки «Работа» (рис. 5.15) время *t* регулируется в пределах 3—8 мс при подключенных тиристорах и равно 8 мс (независимо от положения ручки потенциометра *R121*) при отключенных тиристорах.

Для проверки блока синхронизации при отключенных выходных цепях необходимо вынуть из разъемов базовый и импульсный каналы управления или разорвать на шланге ШП2 перемычки, соединенные с контактами *2*, *5*, *7*, *9*, *17*, и подсоединить со стороны гнезда шланга ШП2 резисторы сопротивлением 5—20 кОм (0,5 Вт) между контактами *1—5*, *1—9*, *1—17*. При этом в кривой сигнала на контактах *19—17* не будет среза вершины импульса, а сигналы на контактах *19—9* и *19—5* будут представлять собой постоянное напряжение, равное 24 В. При размыкании контактов *3* и *5* разъема *X2* сигнал на контактах *19—11* должен быть равен нулю.

Блок обратных связей. Входные и выходные сигналы блока обратных связей приведены в табл. 5.12.

Напряжение на контактах *19—21* и *19—3* должно измеряться прибором с внутренним сопротивлением не менее 50 кОм.

Базовый канал управления. Напряжения входных и выходных сигналов базового канала управления *10* (рис. 5.12) приведены в табл. 5.13.

Таблица 5.11

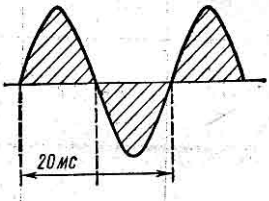
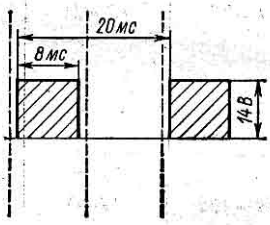
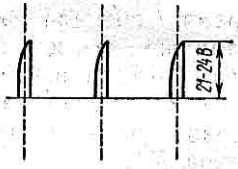
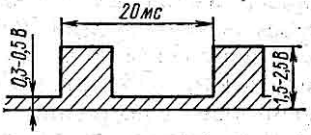
Точки схемы ВДГИ-301	Номера контактов разъема блока синхронизации	Среднее напряжение, В	Форма кривой напряжения
2—4	*22—20*	14—19	
59—117 *59—103*	*19—17* *19—2*	5,5	
59—97	*19—7*	—	
59—99 *59—100*	*19—9* *19—6*	—	
59—81	*19—11*	3—4	Постоянное напряжение

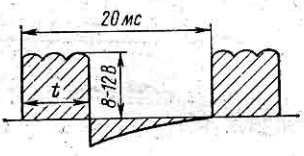
Таблица 5.12

Точки схемы ВДГИ-301	Номера контактов разъема блока обратной связи	Среднее напряжение	Форма кривой
128—59	*18—19*	1—6 В в зависимости от положения ручки потенциометра *R121*	Постоянное напряжение
127—59	*14—19*	0—6 В в зависимости от положения ручки потенциометра *R122*	
59—96	*19—21*	В зависимости от положения ручки потенциометра *R121*: 0—12 В при положении перемычки блока обратных связей «Настройка» 0—10 В при положении перемычки «Работа» и подключенных тиристорах	
59—106	*19—3*	8—12 В в зависимости от положения ручки потенциометра *R122*	

Время *t* сигнала на контактах *13—3* и *11—3* изменяется так же, как и в блоке синхронизации на контактах *19—9* и *19—5* (см. выше). При размыкании контактов *3* и *5* разъема *X2* сигнал на контактах *13—3* и *11—3* должен быть равен нулю независимо от положения ручки потенциометра *R121*.

Для проверки базового канала управления при отключенных выходных цепях необходимо либо вынуть из разъемов блок усилителей *6*, блок обратных связей *8*, блок измерений *7* и импульсный канал управления *9* (рис. 5.12), либо разорвать на шланге ШП2 (рис. 5.8) перемычки, соединенные с контактами *21*, *4*, *11*, *13*, а также подсоединить со стороны гнезда шланга резисторы сопротивлением 1—10 кОм (0,5 Вт) между контактами *21—1*, *11—3*, *13—3*. Сигналы на контактах *13—3* и *11—3*

Таблица 5.13

Точки схемы ВДГИ-301	Номера контактов разъема базового канала управления	Среднее напряжение, В	Форма кривой напряжения
59—96	*19—21*	В зависимости от положения ручки потенциометра *R121*: 0—12 В при положении перемычки блока обратных связей «Настройка» 0—10 В при положении перемычки «Работа» и подключенных тиристорах	Постоянное напряжение
101—76 *104—76*	*13—3* *11—3*	—	

будут отсутствовать. При замыкании накоротко контактов *19—21* на выходах схемы *13—3* и *11—3* будут наблюдаться сигналы, изображенные в табл. 5.13, с $t = 8$ мс, но без обратного «выброса» напряжения («выброс» напряжения является реакцией трансформаторов *TV4* и *TV5* на подачу рабочего импульса, которые при указанной проверке отключены).

Импульсный канал управления. Входные и выходные сигналы импульсного канала управления приведены в табл. 5.14.

Таблица 5.14

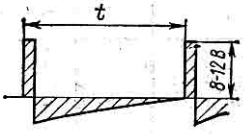
Точки схемы ВДГИ-301	Контакты разъема импульсного канала управления	Среднее напряжение, В	Форма кривой напряжения
59—106	*21—19*	8—12 В в зависимости от положения ручки потенциометра *R122*	Постоянное напряжение
107—76 *110—76*	*5—3* *13—3*	—	

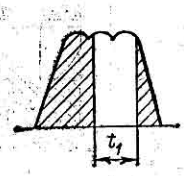
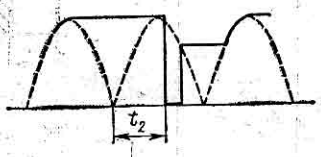
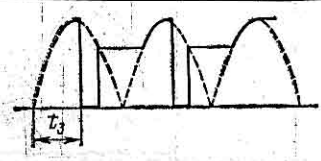
Таблица 5.15

Контакты разъема импульсного канала управления	Время *t*, мс, при положении переключателя *SA3*										
	1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*
13—3	10 (100 Гц)	—	10	—	10	10	—	10	—	10	—
5—3	20 (50 Гц)					10 (100 Гц)					

При проверке сигналов на контактах *5—3* и *13—3* установить ручки потенциометров *R121* и *R122* (рис. 5.11) вправо. Время *t* в миллисекундах зависит от положения переключателя *11* (*SA3*) (рис. 5.11) и должно соответствовать табл. 5.15. Прочерки в таблице означают отсутствие сигнала.

Для проверки импульсного канала управления при отключенных выходных цепях необходимо либо вынуть из разъемов блоки усилителей, обратных связей, измерений и базовый канал управления, либо разорвать на шланге ШП2 (рис. 5.8) перемычки, соединенные с контак-

Таблица 5.16

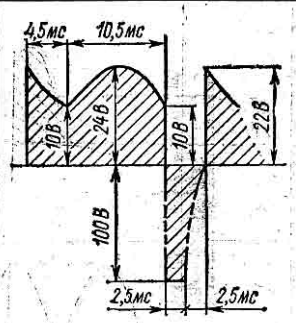
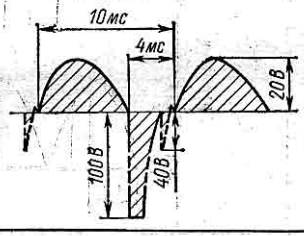
Точки схемы ВДГИ-301	Номера контактов разъема блока усилителей	Форма кривой напряжения	Примечание
91—50 *93—36*	*12—13* *16—17*		Время t_1 изменяется аналогично времени t для сигнала на контактах *19—9* и *19—5* блока синхронизации
95—65	*6—11*		Переключатель *SA3* в положениях *1—5*
			Переключатель *SA3* в положениях *6—11*

тами *21*, *11*, *5*, *13*, *7* и *2*, а также подсоединить со стороны гнезда шланга резисторы сопротивлением 1—10 кОм (0,5 Вт) между контактами *5—3* и *13—3* и резистор сопротивлением 10 кОм между контактами *21—1*. Сигналы на контактах *5—3* и *13—3* будут отсутствовать. При замыкании контактов *19—21* сопротивлением 2—5,1 кОм (0,5 Вт) на контактах *5—3* и *13—3* будут наблюдаться сигналы, изображенные в табл. 5.14. При этом $t = 10$ мс (100 Гц), но обратный «выброс» напряжения отсутствует («выброс» напряжения является реакцией трансформаторов *TV6* и *VT7* на подачу рабочего импульса, которые при указанной проверке отключены).

Блок усилителей. Входные и выходные сигналы блока усилителей приведены в табл. 5.16.

Время t_2 и t_3 для сигналов на контактах *6—11* изменяется при помощи потенциометра *R122* (при правом поло-

Таблица 5.17

Точки схемы ВДГИ-301	Номера контактов разъема блока измерений	Форма кривой напряжений
56—57 *60—57*	*1—3* *22—3*	
63—57	*10—3*	

жении ручки потенциометра *R121*) в пределах 5—10 мс.

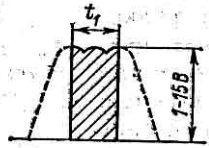
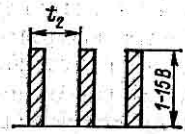
Блок измерений. Входные и выходные сигналы блока измерений приведены в табл. 5.17. Сигналы проверяются только при работе выпрямителя под нагрузкой при положении *11* переключателя *SA3*.

Для проверки сигналов на контактах *1—3* и *22—3* установить ручку потенциометра *R122* влево и при помощи потенциометра *R121* и балластного реостата установить напряжение нагрузки 20 В при токе 200 А. Для проверки сигналов на контактах *10—3* установить ручку потенциометра *R122* вправо, а при помощи потенциометра *R121* и нагрузки установить напряжение 25 В при токе 250 А.

Напряжение на управляющих электродах. Сигналы на управляющих электродах приведены в табл. 5.18.

Время t_1 сигналов в точках *35—5* и *49—6* изменяется так же, как и в блоке синхронизации на контактах *19—9*

Таблица 5.18

Точки схемы ВДГИ-301	Форма кривой напряжения
35—5 *49—6*	
39—5 *44—6* *66—62* *64—62*	

и *19—5* (см. выше). Для проверки сигналов в точках *39—5*, *44—6*, *66—62*, *64—62* установить ручки потенциометров *R121* и *R122* вправо. Время t_2 в миллисекундах зависит от переключателя *SA3* и должно соответствовать табл. 5.19. Прочерки в таблице означают отсутствие сигнала.

Указанные сигналы можно наблюдать в соответствующих точках схемы при отключенных управляющих электродах тиристоров или на блоке проверки поджигающих импульсов (рис. 5.9). В последнем случае сигналы на резисторах *R1* и *R4* будут соответствовать сигналам в точках *35—5* и *49—6*, сигналы на резисторах *R2* и *R3* — сигналам в точках *39—5* и *44—6*, а сигналы на резисторе *R5* — сигналам в точках *66—62* и *64—62*, при этом амплитуда сигналов увеличится до 25—30 В, а на резисторах *R2* и *R3*, кроме основных импульсов, будут наблюдаться пониженные импульсы с амплитудой не более 10 В (см. табл. 5.7). При обнаружении неисправного блока его ремонт и наладка осуществляются в зависимости от вида неисправности в соответствии с описанием схемы и монтажными схемами выпрямителя. После наладки перемычку в блоке обратных связей (рис. 5.12 и 5.15) надо установить в по-

Таблица 5.19

Точки схемы ВДГИ-301	Время t_2, мс, при положении переключателя *SA3*										
	1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*
39—5 *44—6*	10 (100 Гц)	—	10	—	10	10	—	10	—	10	—
66—62 *64—62*	20 (50 Гц)					10 (100 Гц)					

ложение «Работа» и вновь проверить выпрямитель на работоспособность.

Крутые импульсы (ступени *1*, *3*, *5*, *6*, *8*, *10* переключателя *SA3*), которые формируются тиристорами *VS2* и *VS3*, используются редко, в основном при очень длинных сварочных проводах. Рекомендуется для повышения надежности выпрямителя управляющие электроды тиристоров *VS2* и *S3* отсоединить, а провода (точки *39* и *44*) изолировать. Для повышения помехоустойчивости выпрямителя ВДГИ-301 при воздействии на него источников с осциллляторами необходимо выходные шины выпрямителя (точки *59* и *52*) в непосредственной близости от зажимов «плюс» и «минус» соединить с корпусом через конденсаторы *C1* и *C2* (4 мкФ, 160 В) и между собой через резистор *R* (1 кОм, 2 Вт) (рис. 5.16). Соединительные провода должны иметь длину не более 100 мм и сечение не менее 0,75 мм². При высоком уровне помех рекомендуется, кроме того, подводить сетевое питание к выпрямителю ВДГИ-301 и к источникам с осцилляторами от разных распределительных щитов, а также включать последовательно со сварочными проводами воздушные дроссели.

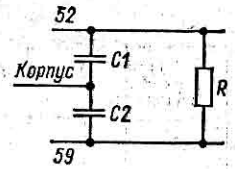


Рис. 5.16. Фильтр от помех, создаваемых осциллятором

Резисторы *R92* (150 Ом) и *R93* (2 кОм), расположенные на блоке обратных связей слева от фиксирующего выреза, надо заменить на одноваттные.

Необходимо периодически производить продувку выпрямителя от пыли сухим сжатым воздухом и протирать печатные платы этиловым спиртом.

Рекомендации по предварительной установке сварочных режимов. Если произведена настройка измерительных цепей, следует для более оперативного подбора оптимального сварочного режима воспользоваться табл. 5.20, в которой приведены рекомендуемые положения переключателя *SA3* и значения сигналов задания по среднему и импульсному напряжениям. В числителе указаны данные для стали (сварка в смеси аргона с 15—20 % углекислого газа), в знаменателе — для алюминиевых сплавов. Затем по табл. 5.21 устанавливается нужная скорость подачи проволоки в метрах в минуту, для определения которой удобно воспользоваться формулой

$$v_{пр} = 0{,}188Dn/t,$$

Таблица 5.20

Сварочный ток, А	Положение переключателя, *SA3*	Сигнал, мкА, предварительной установки напряжения	
		среднего (*R121*)	импульсного (*R122*)
40—70	*2*	35/28	
60—120	*4*	30/25	
90—130	*7*	45/40	65/35
100—170	*9*	30/25	
140—300	*11*	28/35	
		22/30	

Таблица 5.21

Свариваемый металл	Диаметр проволоки, мм	Скорость подачи проволоки, м/мин, при сварочном токе, А					
		40	75	100	150	200	300
Алюминиевые сплавы	1,2	2,4	4,5	6	9	12	18
	1,6	1,4	2,5	3,3	5	6,7	10
	2,0	—	1,6	2,1	3,2	4,2	6,4
Сталь	1,2		2,4	3,6	4,8	7,2	9,6
	1,6	—	—	2	3	4	6
	2,0	—	—	—	1,7	2,3	3,4

где D — диаметр ведущего ролика, мм; n — число оборотов; t — время, за которое подсчитаны обороты, с.

Хорошо подобранный сварочный режим характеризуется короткой дугой, но без замыканий дугового промежутка, и ровным, монотонным гудением дуги. При зависании капель на конце электрода следует увеличить импульсное напряжение, а путем изменения среднего напряжения откорректировать длину дуги. Слишком сильный импульс вызывает выплескивание сварочной ванны. Для хорошего проплавления сварку нужно вести углом вперед. Для уменьшения степени снижения амплитуды тока импульсов при большой длине сварочных проводов (20 м и более) желательно применять провода большого сечения, укладывать их рядом (бифилярно) и не сворачивать в бухты, а если сворачивать, то также бифилярно. Следует помнить, что по сравнению со сваркой на посто-

янном токе импульсная дуга обладает большей облучающей способностью и может вызывать ожоги открытых частей тела. В аварийных ситуациях необходимо нажать аварийную кнопку *18* (рис. 5.11), при помощи которой отключается защитный автомат и снимается питание сети.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ В ИНЕРТНЫХ ГАЗАХ

6.1. КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ СОСТАВНЫЕ ЧАСТИ ОБОРУДОВАНИЯ

Оборудование для сварки неплавящимся электродом в инертных газах классифицируется по роду сварочного тока (постоянный или переменный), способу применения (ручное, автоматическое), назначению (универсальное или специализированное) и составу (в зависимости от наличия механизмов, расширяющих технологические возможности). Классификация представлена на рис. 6.1.

В состав оборудования для ручной сварки постоянным током входят: источник сварочного тока, сварочная горелка, устройство для первоначального поджига (возбуждения) сварочной дуги, аппаратура управления сварочным циклом и газовой защитой.

Оборудование для ручной сварки переменным током, кроме основных узлов, входящих в состав оборудования постоянного тока, включает в себя: устройство для стабилизации горения дуги (стабилизатор), устройство для компенсации или регулирования постоянной составляющей сварочного тока.

Обычно основные узлы, кроме горелки, конструктивно объединены. Такое устройство, снабженное горелкой (или комплектом горелок на разные токи), называется установкой.

В состав оборудования для автоматической сварки входят: сварочная установка, сварочная головка, устройство для перемещения сварочной головки или изделия, аппаратура управления механизмами автомата.

Простейшая сварочная головка включает в себя: сварочную горелку, устройства для установочных перемещений горелки (настройка на шов и установка длины дуги). Обычно сварочная головка содержит и другие функциональные узлы: стабилизатор длины дуги (СДД) или автоматический регулятор напряжения на дуге (АРНД), механизм для подачи присадочной проволоки (МППП), механизмы для установочных перемещений мундштука для подвода присадки к сварочной ванне, устройство для колебания горелки поперек стыка (колебатель).

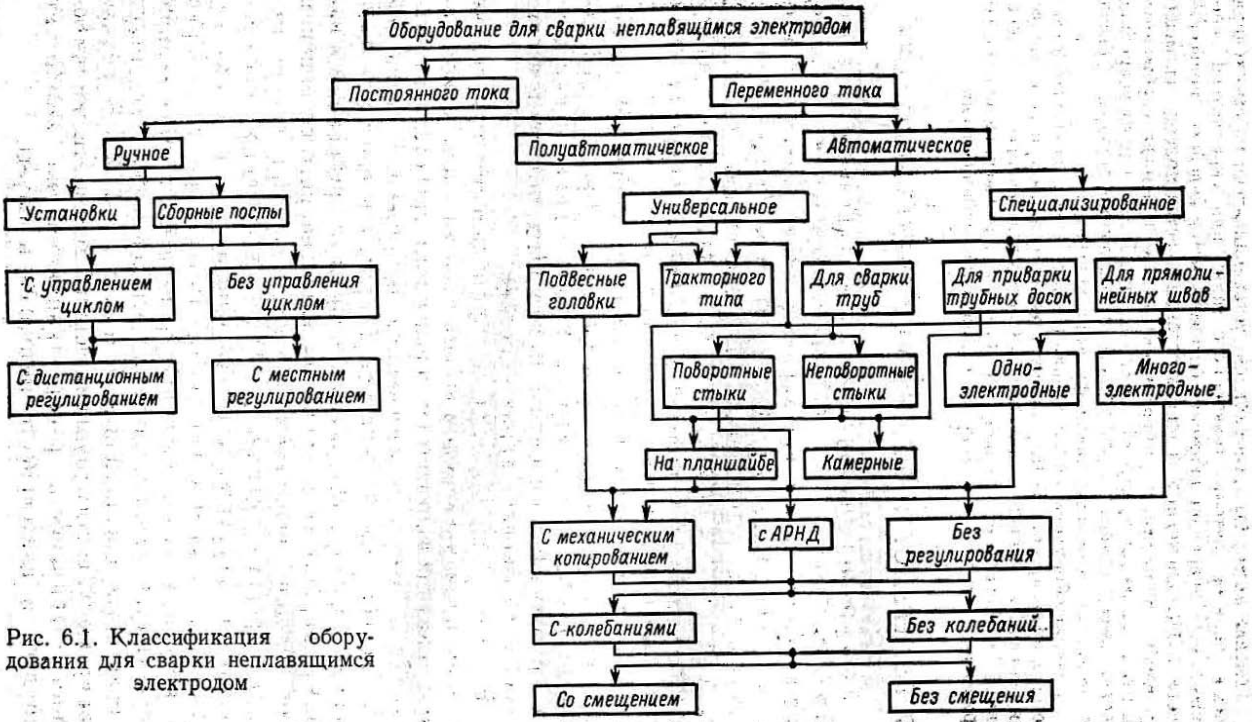


Рис. 6.1. Классификация оборудования для сварки неплавящимся электродом

Головка может быть самоходной, устанавливаться на самоходную тележку-трактор (автомат тракторного типа), или укрепляться неподвижно, если сварочное движение осуществляется изделием (подвесная головка). На самоходных головках устанавливается привод перемещения вдоль линии сварки. Современные автоматы иногда снабжаются системами слежения за линией стыка изделия. В этом случае сварочная головка имеет механизм поперечного перемещения горелки. Обычно этот механизм выполняет также функции колебателя.

В состав оборудования для сварки неплавящимся электродом включается иногда устройство для принудительного жидкостного охлаждения горелки и токоведущих кабелей. Оно состоит из насоса, теплообменника и резервуара с жидкостью (бака). Теплообменник обычно содержит вентилятор для ускорения охлаждения теплоносителя.

6.2. ОСОБЕННОСТИ ИСТОЧНИКОВ СВАРОЧНОГО ТОКА

Характерной чертой источников сварочного тока для сварки неплавящимся электродом является крутопадающая внешняя статическая характеристика. Такая характеристика обеспечивает стабильность тока при колебаниях длины дуги и устойчивость процесса сварки (см. § П4.8 приложения 4). Она достигается при большом внутреннем сопротивлении источника по отношению к сопротивлению дуги. Поэтому для сварки неплавящимся электродом используются источники с высоким напряжением холостого хода, в 4—6 раз превышающим дуговое. Аналогичный результат достигается также глубокой отрицательной связью по току. В этом случае может быть получена вертикальная (штыковая) характеристика.

В связи с тем что глубина проплавления при сварке неплавящимся электродом весьма чувствительна к колебаниям тока, предъявляются повышенные требования к стабильности тока при изменениях напряжения питающей сети, колебаниях температуры и других внешних воздействиях. Степень стабилизации зависит от требований к качеству сварного соединения, от вида сварного соединения и от толщины свариваемого материала. При сварке металлов средних толщин (2—5 мм) в обычных условиях достаточно поддерживать сварочный ток с точностью ± 5 %. При сварке очень тонких материалов, при сварке на весу и в различных пространственных положениях точность стабилизации должна быть повышена и достигает в некоторых специальных условиях 1—2 %. В случае сварки импульсным (пульсирующим) током эти же требования стабильности распространяются на амплитуду импульса и длительность импульса и паузы.

Источники сварочного тока для сварки неплавящимся электродом характеризуются широким диапазоном регулирования тока. Это вызвано необходимостью снижения тока в 2,5—3 раза в конце процесса сварки для заварки образующегося благодаря давлению дуги кратера. По этой причине для сварки неплавящимся электродом не используются источники со ступенчатым или механическим регулированием тока. При плавно-ступенчатом регулировании диапазоны должны перекрываться так, чтобы обеспечивать в одном диапазоне необходимое для заварки кратера снижение тока.

Устройство для заварки кратера содержат все источники сварочного тока для этого вида сварки.

Источники сварочного тока ряда установок (УПС-301, автомат АДГ-506) обеспечивают также плавное нарастание тока в начале сварки, что позволяет избежать разрушения и переноса в шов материала электрода (вольфрама), возникающих в результате резких бросков тока при холодном электроде.

Источники сварочного тока современных установок обеспечивают широко используемые в технологии сварки неплавящимся электродом режимы сварки пульсирующей дугой. Время импульса и паузы изменяется от 0,01 до 1—3 с, глубина модуляции — до 10—12 раз. Применение импульсных режимов налагает требования на динамические свойства источника тока, на постоянную времени его цепи управления.

В качестве источников постоянного (униполярного) сварочного тока, кроме специальных источников, используются сварочные выпрямители с крутопадающей внешней характеристикой, предназначенные для сварки штучными электродами, например выпрямители типов ВДУ-504, ВДУ-505, ВДУ-601. Для этой же цели могут применяться и многопостовые выпрямители совместно с регуляторами сварочного тока. Применение многопостовых выпрямителей с регуляторами сварочного тока целесообразно там, где сосредоточено большое число сварочных постов.

Простейший регулятор сварочного тока — балластный реостат. При пользовании балластными реостатами для ручной дуговой сварки штучными электродами (например, РБ-300) следует помнить, что они рассчитаны на падение напряжения 30 В, в то время как при сварке неплавящимся электродом падение напряжения на балластном реостате из-за низкого напряжения дуги значительно

превышает это значение; для надежной работы следует включать два реостата последовательно.

Выпрямители с падающей характеристикой, предназначенные для ручной сварки штучными электродами, и многопостовые выпрямители с балластными реостатами не удовлетворяют ряду требований, предъявляемых к современным источникам сварочного тока для сварки неплавящимся электродом. Поэтому для сварки ответственных изделий применяют специальные источники тока.

Ряд характерных особенностей имеют источники сварочного переменного тока (см. также § П4.6 приложения 4).

Во избежание неустойчивого горения дуги в связи с резким ростом напряжения повторного зажигания, возникающего вследствие токовой паузы при смене полярности с прямой на обратную, сварка ведется, как правило, в режиме непрерывных токов. Напряжение холостого хода источника при этом удовлетворяет неравенству (П4.37), где под напряжением дуги понимается напряжение горения дуги обратной полярности. Обычно применяются источники с напряжением холостого хода 70—80 В, однако в некоторых отдельных случаях, при высоких дуговых напряжениях, например при сварке в гелии или при сварке на малых токах, напряжение холостого хода достигает 120 В. Для обеспечения безопасности сварщика во всех установках для сварки неплавящимся электродом предусматривается отключение холостого хода через 1—2 с.

Для облегчения повторного возбуждения дуги принимаются специальные меры для ускорения перехода тока через нуль. Для этого цепь подмагничивания должна иметь большую индуктивность рассеяния. При этом ухудшаются возможности управления сварочным током, в частности возможность использования режимов сварки пульсирующей дугой.

Применение специальных трансформаторов с электронным регулированием, тиристорных трансформаторов позволяет избежать трудностей, возникающих при регулировании подмагничивания (см. § 8.4).

В связи с большим различием напряжений горения дуг прямой и обратной полярности и неблагоприятного влияния на сварку возникающей по этой причине постоянной составляющей тока дуги, в источниках переменного

сварочного тока применяются специальные устройства для компенсации постоянной составляющей тока.

Как показано в приложении 4 (§ П4.6), уменьшение постоянной составляющей тока достигается включением активного сопротивления (балластного реостата) в цепь дуги. Такой способ уменьшения постоянной составляющей широко используется в сборных постах, состоящих из сварочного трансформатора, стабилизатора горения дуги, балластного реостатата и горелки. Сопротивление балластного реостата должно составлять примерно 2/3 от индуктивного сопротивления цепи, т. е., например, при сварочном токе 300 А и напряжении холостого хода 72 В оно должно быть равно 0,13 Ом. При использовании балластных реостатов типа РБ-300 или аналогичных им (рассчитанных на падение напряжения до 30 В) уставка тока должна быть около 225 А. При этом падение напряжения на реостате составит 40 В, что приведет к его перегреву. Поэтому необходимо включать в цепь дуги два реостата последовательно. Так как минимальное сопротивление каждого реостата (при полностью включенных рубильниках) равно 0,1 Ом, то суммарное значение их сопротивлений составит не менее 0,2 Ом. Такое сопротивление достаточно для компенсации постоянной составляющей при токах свыше 200 А. При меньших токах сопротивление балластных реостатов должно быть еще увеличено.

При использовании балластных реостатов для компенсации постоянной составляющей следует иметь в виду, что фактический ток дуги будет меньше примерно на 20 %, чем указанный на градуировочной шкале трансформатора; для правильной оценки сварочного тока необходим в этом случае амперметр.

Активное сопротивление в цепи дуги неблагоприятно влияет на восстанавливающееся напряжение в момент смены полярности напряжения дуги и, следовательно, на процесс стабилизации ее горения. Затрудняется и выполнение условия непрерывности тока дуги — неравенства (П4.37) приложения 4 (см. также рис. П2.5 приложения 2). Поэтому недопустимо значительное увеличение активного сопротивления. Активное сопротивление в цепи нужно изменять одновременно с изменением индуктивного сопротивления цепи (уставки тока сварочного трансформатора), регулирование тока с помощью балластного реостата допустимо лишь в незначительных пределах (до 20 %).

Из-за существенных недостатков (неполная компенсация постоянной составляющей тока, ухудшение условий стабилизации горения дуги, значительные потери энергии, необходимость подстройки при регулировании тока) способ уменьшения постоянной составляющей при помощи активного сопротивления применяется лишь в самодельных сборных постах.

Полная компенсация постоянной составляющей тока получается включением последовательно в цепь дуги конденсаторной батареи.

Для установок серии УДАР, предназначенных для сварки на переменном токе алюминия и его сплавов, промышленность выпускала специальные электролитические конденсаторы типа ЭС-1000 (1000 мкФ, $U_{доп} = 12$ В). Установки УДАР-300 на 300 А и УДАР-500 содержат соответственно 100 и 150 таких конденсаторов, соединенных в батареи. Аналогично осуществлялось гашение постоянной составляющей в установках УДГ-301 и УДГ-501. Батареи конденсаторов имеют значительные габариты и массу (около 15 кг на 100 А) и в современных установках по этой причине не используются.

В установках УДГ-301-1, УДГ-501-1 и УДГУ используется диодно-тиристорное устройство для подавления постоянной составляющей сварочного тока, подробно рассмотренное в главе восьмой.

6.3. СВАРОЧНЫЕ ГОРЕЛКИ

Горелки делятся по применению на ручные и автоматические, по системе охлаждения — на горелки с естественным и водяным охлаждением.

Для закрепления вольфрамового электрода и токоподвода к нему чаще всего применяются цанговые зажимы, с цангами, вынимающимися либо в сторону дуги, либо в противоположном направлении. Существуют также и бесцанговые конструкции, например с винтовым поджимом вольфрамового электрода. Такая конструкция более проста, не нуждается в сменных цангах, но не обеспечивает достаточной надежности токоподвода.

Эффективность газовой защиты сварочной ванны во многом зависит от аэродинамических свойств проточной части сопла горелки. Наиболее широкое применение нашли сопла, имеющие коническую камеру на входе газа и цилиндрический канал на выходе. Длина начального

участка газовой струи, осуществляющего защитные функции, для такой конструкции сопла приблизительно равна внутреннему диаметру цилиндрического канала. Это позволяет производить сварку при выдвижении вольфрамового электрода из сопла на расстояние 4—10 мм.

В большинстве конструкций горелок газ вводится в сопло через 8—16 каналов диаметром 1—2 мм. Защитные свойства газового потока улучшаются при вводе газа в сопло через сетчатые пористые мелкоячеистые фильтры.

Ориентировочная зависимость между внутренним диаметром цилиндрической части сопла и сварочным током приведена ниже:

Сварочный ток, А . .	100	200	300	400	500
Диаметр сопла, мм	6—8	10—12	14—16	18—20	20—22

Конструктивное исполнение сопла горелки зависит от удобства выполнения швов в труднодоступных местах, глубоких разделках. Так, при сварке листов металлов толщиной свыше 20 мм без разделки кромок, собранных с щелевым зазором, применяются горелки, сопла которых вводятся в щелевой зазор и располагаются непосредственно над сварочной ванной. При сварке высокоактивных металлов, таких, как титан, цирконий, или в случае работы на открытых площадках при наличии сквозняков на сопла дополнительно устанавливаются защитные приставки или камеры. Качественная газовая защита в них создается надежными местными сопротивлениями движения газа по всему периметру, например в виде шторок, исключающих засасывание воздуха в защищаемое пространство.

На неплавящемся электроде выделяется значительное количество теплоты. Отвод ее может осуществляться либо непосредственно корпусом горелки, либо с помощью специального теплоносителя, чаще всего воды. Иногда горелку охлаждают защитным газом.

По конструкции горелка для ручной сварки должна быть легкой и удобной, в том числе и для сварки в труднодоступных местах. В частности, она должна иметь рукоятку (держатель); место закрепления вольфрама часто соединяют с рукояткой поворотной (гибкой) связью, позволяющей изменять угол между вольфрамовым электродом и рукояткой. Горелки для ручной сварки выпускаются на токи до 500 А и, как правило, имеют водяное охлаждение. Горелки с естественным воздушным охлажде-

Таблица 6.1

Обозначение горелки	Номинальный сварочный ток, А	Диаметр вольфрамового электрода, мм	Вид охлаждения
ЭЗР-5	75	0,5; 1,0; 1,5	Воздушное
ЭЗР-3	150	1,5; 2,0; 3,0	
ЭЗР-4	500	4,0; 6,0	Водяное
ГР-4	200	0,8; 1,0; 1,2; 1,6; 2,0; 3,0; 4,0	
ГР-6	400	3,0; 4,0; 5,0; 6,0	
ГР-10	500	5,0; 6,0; 8,0; 10,0	
ГСН-1	450	3,0; 4,0; 5,0	
ГСН-2	150	2,0; 2,5; 3,0	
ГСН-3	70	2,0; 3,0	

нием применяются в специальных случаях, например для сварки в монтажных условиях на токах до 150 А.

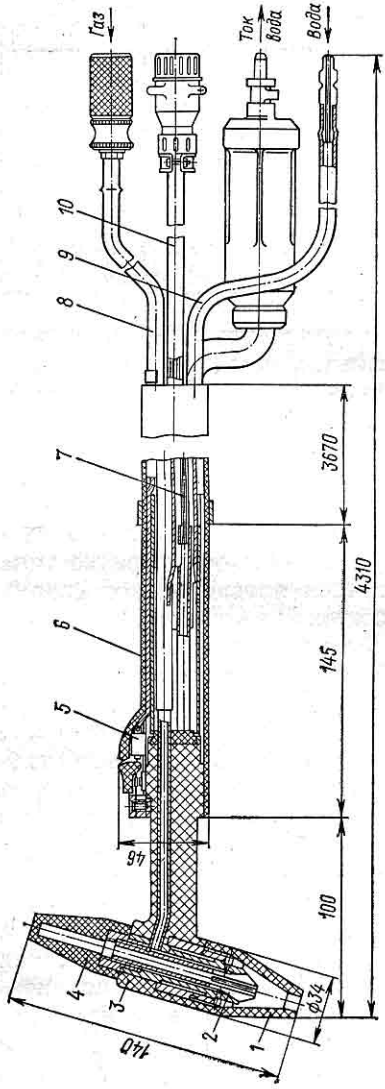
В табл. 6.1 приведены технические характеристики серийно выпускаемых горелок для ручной сварки вольфрамовым электродом.

Ниже приводится описание конструкций некоторых серийно выпускаемых горелок.

Широкое применение в судостроительной промышленности нашли горелки типа ГСН. Сварочная горелка типа ГСН-1 предназначена для ручной аргонодуговой сварки на токах до 450 А. Горелка состоит из корпуса, рукоятки, соединительных проводов и шлангов. В рукоятке смонтирована кнопка для включения и выключения процесса сварки. Корпус и рукоятка соединены шарнирно, что позволяет изменять угол между ними для удобства в работе при сварке в труднодоступных местах. Для большей гибкости сварочный кабель разделен на две параллельные ветви, каждая из которых заключена в резиновую трубку. Корпус горелки, сопло и обе ветви сварочного кабеля охлаждаются проточной водой. Сопла выполнены из меди и устанавливаются на корпусе через резиновые манжеты.

Сварочная горелка типа ГСН-2 предназначена для сварки электродами диаметром 2,0; 2,5; 3,0 мм на токах до 150 А. Конструкция горелки ГСН-2 аналогична конструкции горелки ГСН-1. Сварочный кабель (одиночный) и корпус горелки охлаждаются проточной водой. Горелка комплектуется тремя сменными цангами и двумя соплами.

Рис. 6.2. Горелка для ручной сварки



Сварочная горелка типа ГСН-3 предназначена для сварки электродами диаметром 2,0 и 3,0 мм на токах до 70 А. Малые габариты горелки позволяют выполнять сварку в труднодоступных местах. Горелка комплектуется двумя сменными цангами.

Малая горелка типа ГР-4 предназначена для сварки на токах до 200 А и обеспечивает закрепление вольфрамовых электродов диаметром 0,8; 1,0; 1,2; 1,6; 2,0; 3,0 и 4 мм.

Средняя горелка типа ГР-6 (рис. 6.2) применяется для сварки на токах до 400 А и позволяет закреплять вольфрамовые электроды диаметром 3,0; 4,0 и 6,0 мм.

Большая горелка типа ГР-10 предназначена для сварки на токах до 500 А, и в ней можно закреплять вольфрамовые электроды диаметром 5,0; 6,0; 8,0 и 10 мм.

Каждая горелка состоит из корпуса *3*, рукоятки *6*, сменной цанги *2*, тыльного колпачка *4*, сопла *1*, выключателя *5*, токоподвода *7*, трубки *8* для подвода газа, трубки *9* для подвода воды и проводов для управления *10*. Сопла малой и средней горелок серии ГР

выполнены из керамики, большая горелка имеет медное сопло, охлаждаемое водой. Каждая сварочная горелка комплектуется сменными соплами и цангами соответствующих диаметров Для смены вольфрамового электрода и цанги *2* следует отвернуть тыльный колпачок *4* и вынуть цангу со стороны сопла, а на ее место установить цангу и вольфрамовый электрод необходимого диаметра. Сварочная горелка типа ЭЗР-3 предназначена для ручной сварки на токах до 160 А при ПВ = 60 %. Конструкция горелки рассчитана на работу без водяного охлаждения. Сопло, выполненное из керамики, крепится к корпусу с помощью разжимной цанги, в которой одновременно закрепляется вольфрамовый электрод. В рукоятку вмонтирован вентиль, предназначенный для пуска, регулирования и прекращения подачи газа. Использование сменных сопел и колпачков различной длины позволяет производить сварку в затесненных и труднодоступных местах.

Горелки для автоматической сварки имеют ряд конструктивных особенностей. Важно, чтобы горелка не ухудшала обзора места сварки. Горелки для автоматической сварки, как правило, рассчитываются на большую длительность работы. В связи с этим в горелках принимаются специальные меры для повышения их термостойкости. Сопла для этих горелок изготовляются обычно из латуни или меди и интенсивно охлаждаются, для чего сопло непосредственно омывается водой. Как правило, водяная камера образуется с помощью рубашки, надеваемой на сопло и соединенной с ним пайкой; однако существуют и конструкции, в которых корпус и сопло имеют общую камеру и разделены изоляционными перегородками. От того, насколько хорошо изолирована водяная камера от газовой, зависят чистота газа и качество сварки; с этой точки зрения горелки последнего типа менее надежны.

Горелки, предназначенные для длительной непрерывной сварки вольфрамовым электродом, и горелки, предназначенные для сварки угольным электродом, имеют механизм для осевого перемещения электрода, с помощью которого можно скомпенсировать изменение длины вылета, вызванное расходом электрода. Из-за незначительного расхода вольфрама такие устройства в горелках для вольфрамового электрода предусматриваются лишь в случае, если сварка должна выполняться без перерыва в течение нескольких часов.

Горелки для автоматической сварки конструируются совместно с автоматом и отдельно не выпускаются

6.4. УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПОДЖИГА ДУГИ

Устройства для первоначального поджига дуги делятся на два класса: устройства поджига от короткого замыкания касанием и устройства поджига через зазор.

Поджиг коротким замыканием осуществляется путем кратковременного контакта электрода и изделия и последующего их разведения. Ток, проходящий через микровыступы электрода в момент контакта, разогревает их до температуры кипения, а поле, возникающее при разведении электродов, обеспечивает эмиссию электродов, достаточную для возбуждения дуги.

При поджиге коротким замыканием возможен перенос материала электрода в сварной шов (образование вольфрамовых включений). Для устранения этого нежелательного явления зажигание должно осуществляться при малом токе, не превышающем 5—20 А (в зависимости от формы заточки конца электрода). Устройство для поджига должно обеспечивать малый ток короткого замыкания, поддержание тока на этом уровне до момента образования дуги и лишь затем его плавное нарастание до рабочего. Такое устройство является неотъемлемой частью источника сварочного тока.

Главное достоинство поджига касанием — отсутствие высоковольтных устройств и вызываемых ими при пробое дугового промежутка радиопомех. Благодаря широкому применению тиристорных и транзисторных источников сварочного тока, систем АРНД в автоматах поджиг касанием более перспективен. Такой системой поджига снабжены установка УДГ-201, автоматы АДГ-201 и АДГ-301. Однако из-за опасности образования вольфрамовых включений и усложнения сварочной головки при автоматической сварке в специализированных установках для ручной сварки и автоматах пока более распространен поджиг дуги через зазор путем пробоя промежутка высоковольтными импульсами. Основные требования к устройствам для поджига через зазор (возбудителям дуги или осцилляторам) таковы:

возбудитель дуги должен обеспечивать надежное возбуждение дуги во всех возможных режимах работы сварочной установки за время, пренебрежимо малое по сравнению со временем сварки;

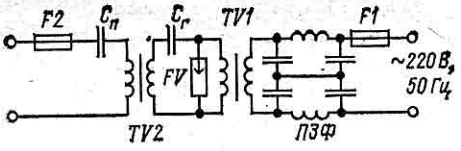


Рис. 6.3. Принципиальная электрическая схема осциллятора ОСПЗ-2М

возбудитель дуги не должен угрожать безопасности сварщика. Для этого генерируемый возбудителем импульс имеет обычно характер высокочастотных колебаний, не опасных для жизни человека. В связи с колебательным характером генерируемого импульса возбудитель называют также осциллятором;

возбудитель не должен влиять на работу сварочной установки и, в частности, ухудшать ее надежность.

Требования к параметрам импульса зависят от условий в дуговом промежутке и свойств источника питания сварочной дуги. Подробно они рассмотрены в приложении 4 (§ П4.7).

Возбудители могут быть предназначены для возбуждения дуги постоянного или переменного тока. В последнем случае к возбудителям предъявляется ряд специфических требований, относящихся, в частности, к моменту поджига дуги (см. § П4.7 приложения 4).

Возбудители могут иметь независимое питание от сети или питаться непосредственно дуговым напряжением. Последние возбудители обладают преимуществами перед первыми: они не нуждаются в дополнительной питающей цепи, автоматически включаются при подаче напряжения на дуговой промежуток и автоматически же прекращают работу после возбуждения дуги.

Основными составными частями возбудителя являются источник высокого напряжения, высокочастотный генератор и устройство ввода высокого напряжения в цепь сварочной дуги.

По типу источника высокого напряжения различают возбудители непрерывного и импульсного питания. В первом случае (примером может служить осциллятор ОСПЗ-2М, схема которого показана на рис. 6.3) высокое напряжение получается при трансформации напряжения с помощью высоковольтного низкочастотного трансформатора *TV1*. Достоинством такого питания является простота схемы. Оно проявляется лишь при питании возбу-

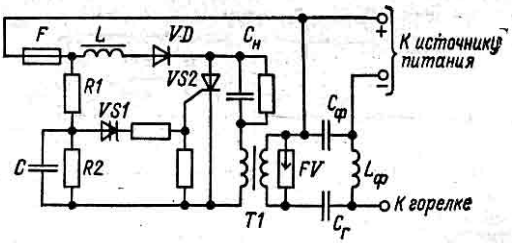


Рис. 6.4. Принципиальная электрическая схема возбудителя дуги ВИР-101

дителя переменным током, т. е. для возбудителей дуги постоянного тока — при независимом питании. Преобразование постоянного тока в переменный сводит это достоинство к нулю и поэтому никогда не применяется.

Недостатками возбудителей непрерывного питания являются наличие высокого напряжения промышленной частоты, опасного для жизни обслуживающего персонала, сложность и высокая стоимость высоковольтного трансформатора и невозможность управления моментом генерации импульсов высокого напряжения на стороне низкого напряжения, которое бывает целесообразно при поджиге дуги переменного тока.

В возбудителе с импульсным питанием (пример — возбудитель ВИР-101, схема которого представлена на рис. 6.4) предварительно запасенная в накопителе энергия выделяется за короткое время на каком-либо из элементов высокочастотного контура, чаще всего на конденсаторе $C_н$.

Одним из важнейших элементов высоковольтного источника является трансформатор. В системах непрерывного питания надежность трансформатора определяет, как правило, надежность всего возбудителя. Это вызвано противоречивостью требований к трансформатору. С одной стороны, это высоковольтный трансформатор с повышенным рассеянием и он должен изготовляться по всем правилам высоковольтного трансформаторостроения. С другой стороны, его габариты и стоимость должны быть малы по сравнению с габаритами и стоимостью всей технологической установки, что может быть достигнуто лишь в условиях крупносерийного производства. Такие условия трудно обеспечить при незначительном выпуске изделия. При импульсном питании уменьшаются объем и габариты

трансформатора. Кроме того, значительно снижаются требования к его изоляции. Наконец, в качестве импульсного трансформатора *T1* (рис. 6.4) могут использоваться изделия, выпускаемые серийно в других отраслях промышленности, в частности катушки зажигания батарейной системы зажигания двигателей внутреннего сгорания (бобины). Эти изделия выпускаются большими сериями, рассчитаны на тяжелые условия работы и обладают высокой надежностью.

Важным достоинством систем импульсного питания является отсутствие высокого напряжения промышленной частоты, опасного для жизни обслуживающего персонала. При непрерывном питании возбудитель принадлежит к классу устройств с напряжением выше 1000 В, что значительно затрудняет его ремонт и настройку; при импульсном питании возникающее высокое напряжение не опасно для жизни из-за малой длительности его действия — возбудитель относится к классу устройств с напряжением до 1000 В, как и вся сварочная установка. Наконец, еще одним достоинством импульсной системы является простота управления возбудителем, осуществляемого с помощью коммутатора. В частности, в цепь управления коммутатором может быть включено пороговое устройство, отключающее возбудитель после зажигания дуги.

Накопитель может быть как емкостным (конденсатор $C_н$ на рис. 6.4), так и электромагнитным (дроссель). В первом случае перекачка энергии происходит при замыкании цепи разряда накопителя (коммутатор — тиристор *VS2* на рис. 6.4), необходим импульсный трансформатор для повышения напряжения; во втором — энергия перекачивается при разрыве цепи накопителя, в качестве накопителя может использоваться сам импульсный трансформатор. На таком принципе работает система батарейного зажигания двигателей внутреннего сгорания. Системы с емкостным накопителем существенно надежнее электромагнитных.

Высокочастотный генератор (разрядник *FV*, конденсатор $C_г$ и первичная обмотка трансформатора высокой частоты *TV2* — рис. 6.3) находится, как правило, на стороне высокого напряжения. В противном случае необходимо было бы трансформировать высокочастотное напряжение до высокой величины. При этом выходное сопротивление возбудителя определялось бы внутренним сопротивлением трансформатора, вторичная обмотка которого

должна была бы иметь большое число витков (не менее нескольких десятков). В то же время сопротивление шунтирующих дуговой промежуток цепей (низковольтный источник питания дуги) не может быть слишком большим. Обычно для увеличения этого сопротивления высокочастотному току возбудителя применяется защитный дроссель, включаемый последовательно в цепь дуги. Падение напряжения на дросселе от тока дуги (постоянного или низкочастотного) должно быть мало по сравнению с дуговым напряжением (доли вольта), и, следовательно, активное сопротивление дросселя должно быть малым (сотые или тысячные доли ома); в то же время на высокой частоте сопротивление дросселя должно быть не менее чем на порядок выше выходного сопротивления возбудителя на этой частоте (составляющего обычно несколько килоом). При таких требованиях добротность дросселя должна быть недостижимо высока (порядка 10^8—10^9). Достижимая добротность на шесть порядков ниже.

Другая причина того, почему высокочастотный генератор должен находиться на стороне высокого напряжения, заключается в необходимости иметь возможность после пробоя передать в дуговой промежуток большую энергию за короткое время (большую мощность) для создания преддуговой проводимости. Высокую мощность в дешевом устройстве проще всего можно получить при наличии накопителя на стороне высокого напряжения.

Высокочастотные генераторы высокого напряжения выполняются обычно на разрядниках (искровые генераторы). Искровые генераторы обладают существенными недостатками. Они генерируют широкий спектр частот, что мешает эффективно подавлять помехи, посылаемые обратно в питающую сеть; колебания в контуре генератора затухают из-за потерь в разряднике. Однако по дешевизне, простоте конструкции, КПД и надежности искровые генераторы не имеют конкурентов. Следует отметить также, что при пробое дугового промежутка возникает искровой разряд, являющийся мощным источником помех в широком диапазоне частот, так что замена искрового генератора каким-либо другим (с более стабильной частотой) мало изменяет общий уровень помех.

Напряжение, образующееся на индуктивном элементе колебательного контура высокочастотного генератора, должно быть приложено к дуговому промежутку (ДП). По тому, как осуществляется ввод напряжения в цепь

дуги, различаются возбудители параллельного и последовательного включения.

В первом случае (рис. 6.3) колебательный контур изолируется от цепи дуги с помощью фильтра низких частот, защищающего элементы контура от протекания больших токов от источников питания дуги. Обычно для этой цели используется проходной конденсатор небольшой емкости $C_п$ (рис. 6.3), имеющий большое полное сопротивление для тока промышленной частоты и малое — для высокочастотного тока. Источник питания дуги должен быть защищен от воздействия высокого напряжения. Для этой цели служит фильтр высоких частот. Обычно применяется Г-образный индуктивно-емкостный фильтр, состоящий из высокочастотного дросселя (воздушного или с ферритовым сердечником) и конденсатора (в состав осциллятора ОСПЗ не входит.) Дроссель включается в цепь дуги последовательно, и его обмотка рассчитана на прохождение полного тока дуги. Конденсатор фильтра включается параллельно источнику питания дуги. Для эффективной защиты источника питания необходимо, чтобы на частоте возбудителя сопротивление дросселя было намного больше сопротивления конденсатора. Для этого, в частности, должны быть малы паразитные параметры дросселя и конденсатора: емкость между обмоткой и корпусом в дросселе и собственная индуктивность конденсатора. Первое достигается специальным исполнением дросселя, а второе — применением малоиндуктивных конденсаторов или параллельным включением конденсаторов двух типов: высокоиндуктивного большой емкости (например, металлобумажного с $L \approx 200$ нГн) и безындуктивного (например, слюдяного или керамического с $L \approx 5$ нГн) малой емкости. Провода, соединяющие защитный конденсатор с зажимами источника питания дуги, должны иметь небольшую длину (небольшую собственную индуктивность).

Фильтр высоких частот служит нагрузкой для высокочастотного генератора возбудителя. Поэтому его полное сопротивление должно быть значительно выше выходного полного сопротивления возбудителя. При большом сечении обмотки дросселя этого трудно достигнуть. Учитывая это, более целесообразно применять последовательное включение возбудителя. В этом случае катушка индуктивности колебательного контура генератора $L_Ф$ (рис. 6.4) или вторичная обмотка высокочастотного трансформатора включаются в цепь последовательно. Источник питания

шунтируется конденсатором большой емкости. Требования к конденсатору аналогичны требованиям к конденсатору фильтра высоких частот. Требования же к катушке индуктивности контура значительно снижены по сравнению с требованиями к дросселю фильтра; степень защиты и нагрузка генератора не зависят от индуктивности дросселя. Фильтр низких частот в этом случае не нужен вовсе.

Возбудитель последовательного включения более эффективен, чем возбудитель параллельного включения. В первом в дуговом промежутке после пробоя выделяется почти вся энергия, накопленная в колебательном контуре генератора (небольшая часть ее расходуется в шунтирующем конденсаторе), во втором значительная часть энергии расходуется в фильтрах высоких и низких частот, часть энергии расходуется на внутреннем сопротивлении контура. Важным достоинством возбудителей последовательного включения является то, что они не требуют установки в цепи источника питания дополнительных элементов для защиты от высокого напряжения (конденсатор защиты обычно включается в состав возбудителя), в то время как возбудители параллельного включения нуждаются в отдельном фильтре высоких частот.

Важнейшими выходными параметрами возбудителя являются выходное напряжение, энергия импульса и ток возбуждаемой дуги.

По выходному напряжению различаются возбудители на 3—5 кВ для аргонодуговой сварки и на 10—20 кВ для воздушно-плазменной резки.

Анализ существующих осцилляторов показывает, что энергия импульса в них изменяется от 0,01 до 0,2—0,3 Дж. В возбудителях последних лет энергия импульса доведена почти до 1 Дж. Этот параметр определяет возможности возбудителя и требования к источнику питания дуги. Возбудители с малой энергией импульса (до 0,2 Дж) не обеспечивали возбуждения дуги в установках для воздушно-плазменной резки и плазменной сварки в углекислом газе.

По току возбуждаемой дуги маркируются возбудители последовательного включения или защитные дроссели возбудителей параллельного включения. Возбудители, предназначенные для возбуждения вспомогательной дуги в плазменных установках, рассчитаны, как правило, на малый действующий ток дуги (до 10 А с учетом ПН). Возбудители для возбуждения основной дуги должны впи-

Таблица 6.2

Параметры	Тип возбудителя				
	ОСППЗ-300	УПД-1	ВИС-501	ВИР-101	ОСПЗ-2М
Напряжение питания, В	200		60—90	180—300	220
Род питающего тока	Переменный		Постоянный		Переменный
Род тока дуги	Переменный Постоянный	Постоянный			Переменный Постоянный
Номинальный ток дуги, А	315	200; 315; 80	500	80	—
ПН, %	60			2	—

сываться по току в ряд номинальных токов сварочных установок (обычно 200, 315 и 500 А при ПН = 60 %).

По конструктивному исполнению различаются возбудители переносные, встраиваемые и универсальные. Как правило, переносные возбудители стремятся изготовлять в виде моноблочного прибора (ОСПЗ-2М, ВИР-101), для встроенных, наоборот, характерно многоблочное исполнение. Универсальные возбудители, предназначенные как для переноски, так и для размещения внутри шкафов управления технологической установки, выполняются в виде 1—2 блоков.

Промышленность выпускает несколько различных типов возбудителей дуги. Для сварки выпускаются осциллятор типа ОСППЗ-300-М и возбудитель УПД-1 для последовательного включения и осциллятор ОСПЗ-2М для параллельного включения. Осцилляторы ОСППЗ и ОСПЗ принадлежат к возбудителям, питающимся от сети переменного тока 220 В, с непрерывным питанием, с искровым высокочастотным генератором. Технические данные этих возбудителей приведены в табл. 6-2.

Устройство поджига дуги УПД-1 представляет собой импульсный возбудитель, генерирующий импульсы с частотой 100 Гц. Его важной особенностью является отсутствие коммутатора (разрядника) на стороне высокого напряжения, где контур возбуждается методом ударного возбуждения. Важным результатом этого является низ-

кий уровень помех, создаваемых этим устройством.

Для плазменной резки выпускаются модификация возбудителя УПД-1 и возбудитель ВИР-101. Последний принадлежит к типу возбудителей с питанием непосредственно от цепи дуги постоянного тока и автоматически прекращает работу после возбуждения. Генерация высокого напряжения в нем осуществляется путем разряда емкостного накопителя через импульсный трансформатор; на стороне высокого напряжения размещен высоковольтный искровой генератор. Его технические данные приведены в табл. 6.2.

Осциллятор ОСПЗ-2М (рис. 6.3) является типичным осциллятором непрерывного действия, предназначенным для параллельного подключения. Осциллятор питается от сети переменного тока через предохранитель *F1*, помехозащитный фильтр (ПЗФ). Источником высокого напряжения служит трансформатор низкой частоты *TV1*. Разрядник *FV*, конденсатор $C_р$ и первичная обмотка трансформатора высокой частоты образуют колебательный контур высокочастотного генератора. Проходной конденсатор $C_п$ образует фильтр низких частот. Предохранитель *F2* защищает обмотку трансформатора *TV2* при пробое конденсатора $C_п$.

Возбудители ВИС-501 и ВИР-101 (рис. 6.4) представляют собой устройства для возбуждения дуги постоянного тока, питающиеся от цепи дуги через предохранитель *F*. Резисторы *R1*, *R2*, конденсатор *C* и диодный тиристор (динистор) *VS1* образуют релаксатор, при срабатывании которого конденсатор *C* разряжается через управляющую цепь тиристора *VS2*. При этом тиристор открывается и разряжает через первичную обмотку импульсного трансформатора *T1* заряженный через дроссель *L* и диод *VD* накопительный конденсатор $C_н$. Разрядник *FV*, конденсатор *C* и дроссель $L_ф$ образуют генератор высокой частоты; конденсатор $C_ф$ совместно с дросселем $L_ф$ образуют фильтр высоких частот.

Для возбуждения и стабилизации горения дуги переменного тока выпускается возбудитель-стабилизатор дуги ВСД-01. Его описание приведено в следующем параграфе.

6.5. СТАБИЛИЗАТОРЫ ГОРЕНИЯ ДУГИ

Стабилизатор горения дуги является необходимым элементом оборудования для дуговой сварки неплавящимся электродом на переменном токе промышленной частоты.

Его задача — обеспечение повторного возбуждения дуги при смене полярности с прямой на обратную. Требования к стабилизатору определяются необходимостью перехода разряда из тлеющего в дуговой через стадию аномального тлеющего разряда. Стабилизатор должен генерировать импульсы достаточной энергии и длительности, чтобы обеспечить повторное возбуждение дуги. Стабилизатор, кроме того, не должен быть опасен для сварщика и оборудования. Обычно амплитуда импульса напряжения стабилизатора достигает 400—600 В. На это напряжение должны быть рассчитаны все элементы, присоединенные к сварочной сети, в том числе и полупроводниковые, например тиристоры.

Активными называют стабилизаторы, в которых энергия импульса накоплена в каком-либо накопителе (индуктивном или емкостном) и вводится в цепь дуги по команде управляющего устройства. В пассивных стабилизаторах импульс генерируется за счет процессов, происходящих в цепи дуги.

Практическое распространение получили лишь стабилизаторы активного типа. По тем же причинам, что и для возбудителей, широко применяются стабилизаторы с емкостным накопителем.

Важнейшей частью стабилизатора является схема управления моментом генерации импульса. Как следует из § П4.6 приложения 4, импульс стабилизатора должен генерироваться после смены полярности дугового напряжения с некоторой задержкой, определяемой временем развития тлеющего разряда. Возможны два пути генерации импульса управления: потенциальный и дифференциальный. В первом случае импульс управления генерируется при достижении напряжением дуги некоторого уровня, во втором — при резком изменении напряжения дуги. В случае если запаздывание схемы невелико, не более 1—2 мкс, целесообразно применять потенциальный метод. Он позволяет выделить импульс тогда, когда он необходим, т. е. при формировании аномального тлеющего разряда. При значительном запаздывании входной сигнал схемы управления должен быть выделен в начальной стадии процесса восстановления напряжения. Здесь целесообразно применение дифференциальных схем. В схемах дифференциального управления в цепь коммутатора вводится принудительная задержка. Время задержки (60—200 мкс) зависит от тока и скорости восста-

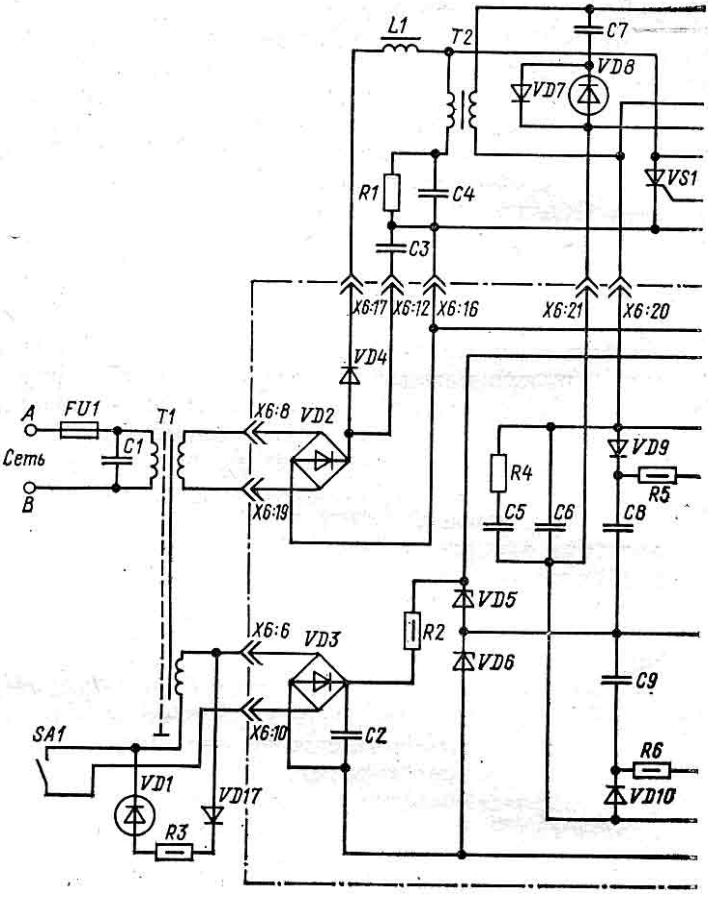
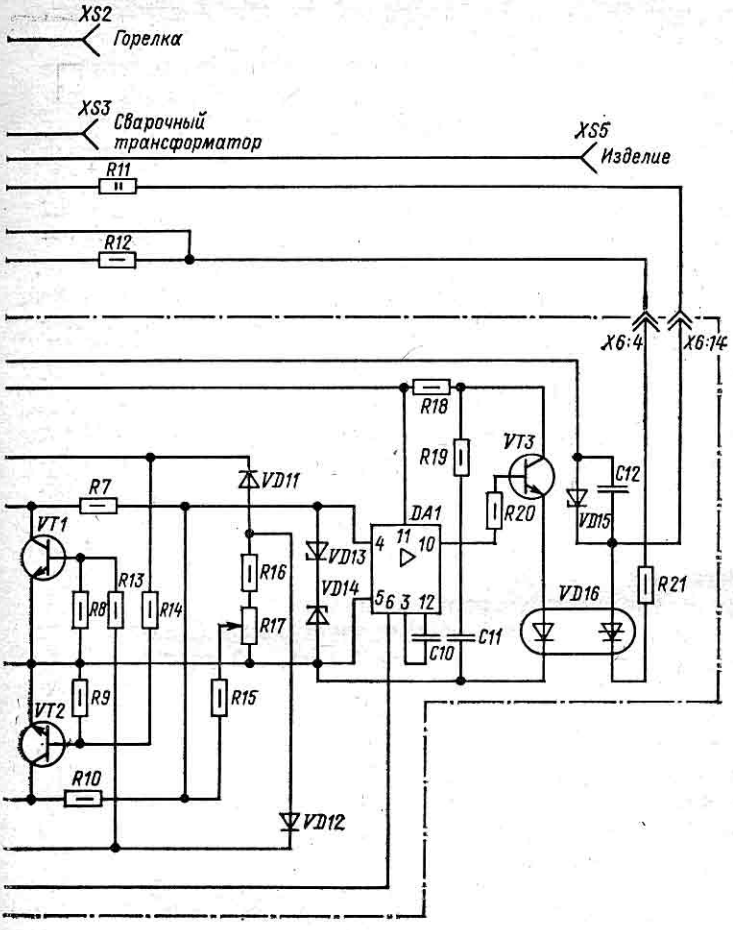


Рис. 6.5. Принципиальная электрическая схема

новления напряжения. Обычно вводится задержка 60—100 мкс, которая вместе с запаздыванием срабатывания коммутаторов обеспечивает необходимое запаздывание импульса.

Стабилизаторы, как правило, являются частью установок для сварки на переменном токе и отдельно не выпускаются.

В сборных постах для стабилизации используются возбудители дуги — осцилляторы, генерирующие боль-



возбудителя-стабилизатора дуги ВСД-01УЗ

шое число импульсов в полупериод. Генерируемые ими импульсы обеспечивают повторное зажигание дуги, однако задержка в зажигании при этом не контролируется, действующий ток дуги колеблется и качество сварки невысоко. Кроме того, несинхронизированные осцилляторы создают значительные радиопомехи.

Для стабилизации дуги могут использоваться возбудители-стабилизаторы, управляемые напряжением дуги. К числу таких устройств относится возбудитель-стабили-

затор дуги ВСД-01УЗ. Его принципиальная схема приведена на рис. 6.5.

Трансформатор *T1* питает выпрямители источника высокого напряжения (мост *VD2*, сглаживающий конденсатор *C3*) и источника питания цепей управления (мост *VD3*, сглаживающий конденсатор *C2*, нагрузочный резистор *R2*, стабилитроны *VD5*, *VD6*).

От конденсатора *C2* через диод *VD4* и дроссель *L1* заряжается накопитель-конденсатор *C4*. Благодаря резонансному характеру заряда накопителя и его перезаряду (изменению полярности) при разряде напряжение на нем вчетверо превышает напряжение питания (на конденсаторе *C3*). Перезаряд накопителя через первичную обмотку трансформатора *T2* происходит при открытии тиристора *VS1*. Во вторичной обмотке трансформатора *T2*, включенной последовательно в цепь дуги, происходит при этом ударное возбуждение высокочастотного контура, образованного индуктивностью этой обмотки и емкостью конденсатора *C7*. Контур замыкается через защитные конденсаторы *C6* и *C5*. Резистор *R4* в цепи *C5* служит для гашения коммутационных колебаний при смене полярности дугового напряжения.

В цепи управления напряжение каждой полуволны по своему каналу поступает на инверсный вход компаратора *DA1*. Напряжение полуволны усредняется на конденсаторах *C8* или *C9*. Транзисторные ключи *VT1* и *VT2* переключают напряжение сравнения таким образом, что мгновенное значение напряжения, снимаемое с движка потенциометра *R17*, сравнивается с усредненным значением напряжения своей полуволны. Благодаря такой схеме управления компаратор срабатывает при постоянной фазе напряжения холостого хода, регулируемой потенциометром *R17*, или при достижении напряжением дуги определенного уровня, своего для каждой полуволны.

Срабатывание компаратора приводит к открытию транзистора *VT3*, разряду конденсатора *C1* через транзисторный переход и светодиод оптронного тиристора *VD16* и открытию тиристора. Через оптронный тиристор *VD16* и управляющий переход тиристора *VS1* разряжается конденсатор *C12* и открывает тиристор.

Благодаря отсутствию накопителя на стороне высокого напряжения и искрового коммутатора уровень генерируемых возбудителем-стабилизатором помех радиоприему

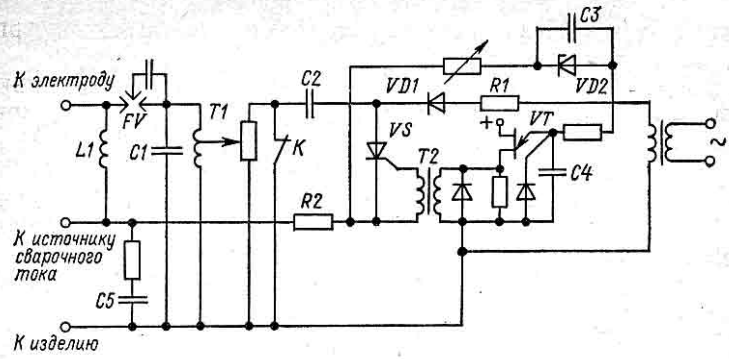


Рис. 6.6. Принципиальная электрическая схема возбудителя-стабилизатора дуги установок УДГ-301 и УДГ-501

соответствует установленным нормам, так что он может работать в длительном режиме.

Другим видом возбудителя-стабилизатора является возбудитель-стабилизатор установок УДГ-301 и УДГ-501. Он работает в различных режимах при возбуждении и стабилизации. Цепь его коммутатора управляется при сварке напряжением дуги, при возбуждении — напряжением холостого хода. Схема возбудителя-стабилизатора представлена на рис. 6.6. Здесь накопитель *C2* заряжается от однополупериодного выпрямителя *VD1* через резистор *R1* и разряжается либо через первичную обмотку автотрансформатора *T1* (при разомкнутом контакте *K* — холостом ходе источника питания), либо непосредственно на дуговой промежуток (через дроссель *L1* и резистор *R2*) — при дуге (контакт *K* замкнут коммутатором *VS*).

При холостом ходе импульс, трансформированный автотрансформатором *T1*, заряжает конденсатор *C1* (высоковольтный накопитель). При пробое разрядника *FV* возникают колебания в контуре, образованном конденсатором *C1* и дросселем *L1*. Конденсатор *C5* служит для защиты источника питания от высокого напряжения. Тиристор управляется от двухбазового диода *VT* через импульсный трансформатор *T2*. На эмиттер двухбазового диода поступает разность напряжений обратной полуволны и стабилитрона *VD2* и заряжает конденсатор *C4* до срабатывания диода *VT*. При резкой смене напряжения

(в пик зажигания) напряжение поступает через конденсатор *С3*, что обеспечивает своевременное выделение импульса при сварке.

6.6. ЦИКЛ СВАРКИ

Установки, предназначенные как для автоматической, так и для ручной сварки неплавящимся электродом, снабжаются устройствами для выполнения определенного цикла сварки. Блок цикла сварки обеспечивает:

включение цикла по команде оператора или сварщика;

включение подачи инертного газа;

запрет на включение сварочного тока до момента, пока инертный газ не поступит в зону сварки и не вытеснит имеющийся там воздух;

включение устройства для зажигания дуги (возбудителя или осциллятора при возбуждении дуги через зазор или устройства, обеспечивающего зажигание дуги коротким замыканием при малом токе);

нарастание тока до рабочего;

отключение устройства для возбуждения дуги;

включение движения сварочной горелки и подачи присадочной проволоки;

по команде оператора — снижение сварочного тока в течение установленного оператором времени;

отключение источника сварочного тока;

отключение подачи газа в течение заданного времени и возврат схемы в исходное состояние.

Циклограмма процесса приведена на рис. 6.7. Ниже даны обычные для сварки временные интервалы (в секундах):

«Продувка»	0,3—3,0
«Газ после сварки»	3—30
«Заварка кратера»	3—15
Задержка движения каретки, подачи присадки, включения АРНД, колебаний	0—3
Задержка отключения каретки, подачи присадки, колебаний	0—15

При их определении необходимо учитывать, что скорость распространения газа по шлангу от газового клапана до места сварки составляет несколько метров в секунду, так что обычно необходимая задержка для продувки шлангов принимается равной 0,5 с на 1 м шланга.

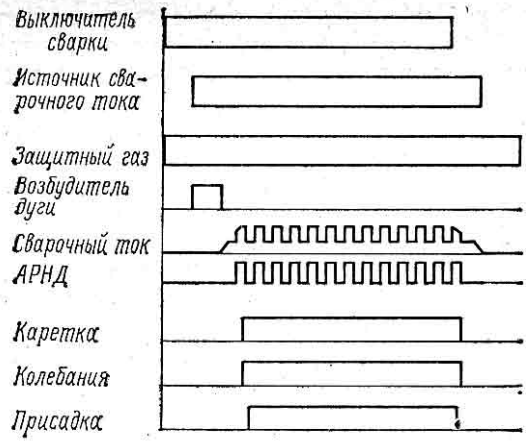


Рис. 6.7. Типовая циклограмма процесса сварки неплавящимся электродом

Время снижения тока (заварка кратера) и время задержки отключения газа после сварки зависят от конкретных условий теплоотвода от сварочной ванны и определяются экспериментально.

При автоматической сварке с присадочной проволокой блок цикла дополняется командами на включение и отключение подачи присадки и сварочного движения. Обычно сварочное движение начинается после возбуждения дуги с некоторой задержкой, необходимой для образования ванны, и заканчивается после начала спада тока дуги (но до его окончания). Необходимые временные интервалы определяются экспериментально. Аналогично поступают с командой на подачу присадочной проволоки.

В ряде автоматов для сварки неплавящимся электродом при сварке в разделку электрод колеблется поперек направления сварки. Колебания осуществляются обычно электродвигателем. Возможны две системы: вращательное движение преобразуется в колебательное механическими устройствами или вращательное движение преобразуется в колебательное при реверсе двигателя. В первом случае блок цикла управляет лишь моментами включения и отключения колебаний. Начало колебаний обычно совмещено с началом сварочного движения, а конец — с моментом начала заварки кратера. Во втором варианте исполнения возможны также плавное нарастание ампли-

туды колебаний по определенному закону и спад ее совместно с током сварки. При сварке изделий большой толщины применяется также более сложная, так называемая синхронно-импульсная технология. В этом случае с колебаниями электрода синхронизированы импульсы сварочного тока и изменение скорости подачи присадки. Сварочный ток и скорость подачи присадки увеличиваются в крайних положениях колебателя, т. е. вблизи кромок. В ряде автоматов во время импульса тока дуга перемещается вдоль кромки, а в промежутке между импульсами движение вдоль шва прекращается и осуществляется лишь поперечное перемещение горелки.

Одной из важных частей автомата для сварки неплавящимся электродом является автоматический регулятор напряжения дуги (АРНД). АРНД поддерживает заданное напряжение дуги, пропорциональное, при неизменном токе дуги, ее длине. Так как напряжение дуги зависит также и от тока дуги, то при неизменном его значении в случае изменения тока происходило бы нежелательное изменение длины дуги. Ток дуги изменяется при возбуждении дуги, при заварке кратера и в течение периода при сварке пульсирующим током. Блок цикла должен учитывать эту особенность системы АРНД. Обычно АРНД включается лишь после возбуждения дуги и отключается в процессе заварки кратера. При возбуждении дуги коротким замыканием на малом токе система АРНД может включаться до возбуждения дуги, однако ее характеристики (чувствительность и быстродействие) должны отличаться от характеристик в процессе сварки во избежание возникновения автоколебаний. При сварке пульсирующей дугой (так называемой импульсной) регулирование осуществляется либо только во время импульса, либо только во время паузы; причем в ту часть периода, когда регулирование не производится, система блокируется. Применяются также системы регулирования напряжения дуги, в которых задаются различные уровни дугового напряжения при токе импульса и токе паузы. При высокой чувствительности системы регулирования в этом случае трудно избежать колебаний длины дуги. Необходимые переключения АРНД осуществляет обычно блок цикла. В случае применения микро-ЭВМ на нее может быть возложена задача поддержания длины дуги согласно уравнению

$$U_д = U_д (i,\ l).$$

В этом случае необходимость отключения АРНД при изменении тока отпадает.

Типичным блоком цикла сварки в ручной установке является блок цикла установок УДГ-301 и УДГ-501. Блок имеет ряд выдержек времени на включение, конструктивно выполненных на двухбазовых диодах. В качестве усилителя использованы тиристоры КУ101 и реле РПУ-0. При необходимости выдержка времени на отключение создается путем шунтирования (гашения) соответствующего тиристора. Выдержки времени могут быть выполнены также и на других усилителях, например на полевых транзисторах. В этом случае резко уменьшается необходимая для создания выдержки емкость. Примером такого исполнения блока цикла сварки является блок цикла установки УПС-301.

6.7. УСТАНОВКИ ДЛЯ РУЧНОЙ СВАРКИ

Источник тока для сварки неплавящимся электродом обычно конструктивно объединяется с устройством для поджига дуги и аппаратурой управления циклом сварки и подачей защитного газа. Это устройство снабжается сварочной горелкой или комплектом горелок на разные токи, комплектом соединительных проводов и шлангов. Источник тока для сварки переменным током включает в себя устройство для подавления постоянной составляющей тока, с ним конструктивно объединяется также стабилизатор горения дуги. В таком виде эти изделия содержат все необходимое для ручной сварки и называются установками для сварки постоянным или соответственно переменным током.

Промышленность серийно выпускает установку для плазменной и аргонодуговой сварки на постоянном токе типа УПС-301У4. В нее входят: сварочный выпрямитель с тиристорным регулированием сварочного тока, горелки для плазменной и аргонодуговой сварки, блок поджигания, содержащий возбудитель дуги типа УПД-1 или ВИС-501, газовая аппаратура (клапан, ротаметры), дистанционный регулятор сварочного тока. Установка обеспечивает сварку пульсирующей дугой и точечную сварку.

Для сварки от мощных шинопроводов постоянного тока (от многопостовых источников) выпускается установка УДГ-201У3. Установка представляет собой переносной транзисторный регулятор тока, имеет вертикаль-

Параметры	УДГ-301-1	УДГ-501-1
Род сварочного тока	Переменный	
Номинальный сварочный ток, А	315	500
Номинальная продолжительность нагрузки (ПН), %	60	
Напряжение холостого хода, В	72	
Рабочее напряжение, В	16	
Пределы регулирования тока, А	15—25 20—100 90—315	40—150 120—500
Масса, кг	380	460
Габаритные размеры, мм	700×1100×900	900×1100×900

* В числителе указано постоянное напряжение, в знаменателе

ную («штыковую») внешнюю характеристику, обеспечивает зажигание дуги коротким замыканием на малом токе, работу в режиме сварки пульсирующей дугой, снабжена устройством для плавного нарастания тока при зажигании дуги и плавного снижения его в конце сварки, комплектуется газовой аппаратурой и горелкой без водяного охлаждения.

Для сварки на переменном токе промышленность выпускает комплектные установки типов УДГ-301-1 и УДГ-501-1. Установки содержат сварочный трансформатор с подмагничиваемым шунтом, возбудитель-стабилизатор дуги, диодно-тиристорную ячейку для компенсации постоянной составляющей сварочного тока, аппаратуру управления циклом, устройство для заварки кратера и комплектуются сварочными горелками серии ГР. Для увеличения радиуса действия эти установки имеют съемный переносной блок поджигания, в котором размещены газовый клапан, возбудитель-стабилизатор дуги и орган дистанционного управления сварочным током.

На базе установки УДГ-301 выпускается универсальная установка типа УДГУ-301 для сварки на переменном и постоянном токе.

Технические данные установок для ручной сварки приведены в табл. 6.3.

Таблица 6.3

УДГУ-301	УПС-301	УДГ-201
Постоянный Переменный	Постоянный	
315 60		200 40
65/72 * 12/16 * 15—25 20—100 90—315 420 900×1100×900	68 40 4—25 25—315 340 900×1100×1100	60 12 7—200 30 300×500×400

— переменное.

Для ручной сварки на переменном токе применяются сварочные трансформаторы совместно со стабилизатором дуги и компенсатором постоянной составляющей сварочного тока. В комплекте с горелками и газовой аппаратурой источник сварочного тока образует пост для ручной сварки. В состав простейшего поста для сварки на переменном токе входит сварочный трансформатор, стабилизатор дуги или постоянно включенный осциллятор (возбудитель) и балластный реостат в качестве компенсатора постоянной составляющей тока дуги. Для таких постов промышленность выпускает сварочный трансформатор в комплекте с возбудителем-стабилизатором дуги ВСД-01—трансформатор ТДМ-503-4.

6.8. МЕХАНИЗМЫ СВАРОЧНЫХ АВТОМАТОВ

Сварочная головка. Под сварочной головкой понимается устройство, на котором установлены сварочная горелка и все необходимые для технологических операций механизмы. Сварочная головка может быть закреплена неподвижно (в этом случае при сварке перемещается изделие) и может перемещаться вдоль шва с помощью внешнего привода (например, ходового винта) или иметь собственный привод (самоходная головка). В универсаль-

ных автоматах головка устанавливается обычно на самоходную тележку — сварочный трактор. Сварочная головка должна обеспечивать установочные перемещения электрода поперек шва и перпендикулярно к его поверхности (вдоль электрода). Важнейшие требования к механизмам головки — жесткость конструкции и отсутствие люфтов. Суммарные перемещения конца электрода из-за нежесткости механизмов и наличия люфтов не должны превышать 0,5 мм, а при прецизионной сварке, например при сварке труб атомных реакторов, — не более 0,2 мм. При сварке с колебаниями электрода поперек шва эти требования могут быть несколько ослаблены.

В качестве механизмов для установочных перемещений могут использоваться механизмы АРНД и слежения за стыком (если они имеются на сварочной головке). Для установочных перемещений эти механизмы должны иметь ручное управление — механическое (с помощью маховика или рукоятки) или электромеханическое (с помощью кнопок управления электродвигателем). Скорости перемещения горелки должны быть при этом небольшими — не более 1—2 мм/с.

Головки универсальных сварочных автоматов обеспечивают возможность поворота горелки в плоскости, перпендикулярной направлению сварки (для сварки угловых швов и горизонтальных швов на вертикальной плоскости), и в плоскости, параллельной направлению сварки (для обеспечения возможности сварки «углом вперед» или «углом назад»). Угол поворота в плоскости, параллельной направлению сварки, составляет $\pm 30°$.

Скорость сварки в универсальных сварочных автоматах плавно регулируется в широких пределах. Обычно сварка ведется со скоростью 10—20 м/ч (3—6 мм/с), однако широко применяются и режимы сварки со скоростью до 70 м/ч (около 2 см/с). В некоторых специальных случаях сварка выполняется в другом диапазоне скоростей. Например, при производстве тонкостенных нержавеющих труб скорость сварки достигает 0,1—0,2 м/с, а при сварке неповоротных стыков толстостенных труб падает до 0,5 мм/с.

Для обеспечения хорошего качества сварки скорость сварки должна поддерживаться на заданном уровне с точностью не ниже 10 %. Для особо ответственных соединений точность поддержания скорости сварки должна быть повышена до ± 2 %. При сварке неповоротных сты-

ков труб часто программируют скорость сварки в зависимости от положения горелки на трубе, что позволяет поддерживать параметры сварного шва при изменении направления силы тяжести. Для привода головки обычно используется электродвигательный привод постоянного тока с фазовым (на тиристорах) или широтно-импульсным (на транзисторах) регулятором скорости. Для повышения точности стабилизации скорости в широком диапазоне ее изменения стремятся использовать для привода электродвигатели, снабженные таходатчиками.

Механизмы подачи присадочной проволоки. Возможность введения в шов дополнительного (присадочного) металла значительно расширяет технологические возможности сварки неплавящимся электродом.

Подача присадки осуществляется таким образом, чтобы ее плавление происходило у края сварочной ванны. Поэтому механизм подачи присадки обеспечивает ее подвод под небольшим углом к поверхности изделия. Для аустенитных сталей и титана этот угол не должен превышать 35°, а для алюминия — 15—20°. Устройство для подачи присадки позволяет, как правило, регулировать положение конца присадки по высоте и угол между присадочной проволокой и электродом. Обязательно обеспечивается также подстройка положения присадки поперек шва.

Так как требуется высокая точность настройки положения присадки относительно электрода, то механизм подачи часто снабжается правильным устройством. Правка проволоки осуществляется трех- или пятироликовым устройством в плоскости намотки проволоки в кассете.

Скорость подачи присадки поддерживается постоянной при неизменном токе дуги. При сварке пульсирующим током с частотой не ниже 1 Гц скорость подачи присадки обычно неизменна в период импульса и паузы.

Если сварка ведется с поперечными колебаниями электрода, то при небольшой амплитуде колебаний — до 3 мм (т. е. при размахе до 6 мм) образуется единая сварочная ванночка. Присадку при этом не колеблют. При большой амплитуде колебаний электрода присадку колеблют поперек шва синхронно с электродом, с той же или несколько уменьшенной (на 0,5—1 мм) амплитудой. Следует заметить, что колебания присадки значительно усложняют формирование шва. Обычно в тех случаях, когда

применяется такая технология, угол подвода присадки к изделию должен быть увеличен до предельных для данного материала значений.

Как указывалось, для сварки изделий большой толщины используется синхронно-импульсная технология. Частота изменения тока при этом невелика, обычно доли герца, и необходимо изменять скорость подачи присадки при переходе от тока импульса к базовому току. Эта особенность технологии значительно усложняет привод подачи присадки. Необходимо, чтобы он обладал достаточным быстродействием, ужесточаются требования к механизмам подачи в отношении люфтов.

Скорость подачи присадки плавно регулируется в широких пределах — обычно от $0{,}2v_{св}$ до $(1{,}5—2{,}0)\ v_{св}$ ($v_{св}$ — скорость сварки) и поддерживается с точностью $\pm(5—10)\%$. Для подачи присадки используются нереверсивные электроприводы с фазовым или широтно-импульсным регулированием. В конце сварки во избежание приваривания присадки к изделию применяется резкое торможение или, реже, кратковременный реверс присадки. Механизм подачи присадки устанавливается на сварочной головке, кассета с проволокой — тут же или, при неподвижной головке, может быть отнесена в сторону.

Механизмы колебаний электрода поперек шва. Механизмы колебаний должны обеспечить колебательное перемещение электрода при сварке поперек шва с плавно регулируемыми частотой и амплитудой. Применяются различные виды движений электрода. Электрод может двигаться по прямой или качаться вокруг оси, перпендикулярной плоскости сварки. В этих случаях длина дуги при колебаниях не изменяется. Иногда качания электрода осуществляются вокруг оси, параллельной шву. В этом случае при колебаниях изменяется длина дуги. Если ось качаний отнесена от сварочной ванны достаточно далеко, это изменение длины дуги несущественно и может быть нечувствительно для системы АРНД. В ряде случаев, например при сварке в разделку, колебания электрода вокруг оси, параллельной стыку, позволяют улучшить условия сварки у стенок разделки. Расстояние от оси качаний до конца электрода в этом случае должно быть достаточно мало, порядка амплитуды колебаний, что позволяет частично направить дугу на стенку разделки и обеспечить провар в углу — в наиболее подверженном образованию несплавлений месте.

Колебания осуществляются обычно путем преобразования вращательного движения электродвигателя в возвратно-поступательное или колебательное. С этой целью используются кривошипно-шатунные, кулисные или кулачковые механизмы. Главная трудность при создании механизма колебаний — обеспечение плавного регулирования амплитуды. Обычно механизмами регулирования можно устанавливать необходимую амплитуду, но нельзя корректировать ее «на ходу», что часто бывает желательно. Механические регуляторы амплитуды колебаний обычно не используются из-за сложности, громоздкости и ненадежности механических систем.

В тех случаях, когда регулирование амплитуды «на ходу» необходимо, целесообразно применять системы с реверсом электродвигателя. Такая система не нуждается в преобразователе вращательного движения в колебательное, так как колебания осуществляет сам приводной электродвигатель. Система колебаний с реверсом электродвигателя обладает большой гибкостью: можно изменять форму колебаний, задерживать движение электрода в любой точке (обычно у стенок разделки) на любое время, плавно регулировать амплитуду колебаний, программировать ее в случае необходимости, а при наличии «датчика стенки разделки» — управлять ею автоматически. Для колебаний электрода с реверсом электродвигателя может быть использована система слежения за стыком, при этом не требуется никаких дополнительных технических устройств. Недостатками системы колебаний с реверсом электродвигателя являются тяжелый режим работы электродвигателя и сложность системы управления. Такие системы применяются в сложных специализированных автоматах, например в автоматах для сварки труб большого диаметра. В частности, такие системы незаменимы при синхронно-импульсной технологии сварки.

6.9. СТАБИЛИЗАЦИЯ ДЛИНЫ ДУГИ

Поддержание заданной длины дуги необходимо для обеспечения стабильности параметров шва. Особенно важно поддержание длины дуги при сварке короткой или погруженной в металл дугой, когда незначительные изменения длины дуги могут привести либо к короткому замыканию электродов, либо к резкому уменьшению глубины проплавления. Поэтому современные автоматы

обязательно снабжаются устройствами для стабилизации длины дуги.

Простейшим устройством такого назначения является механический копир-стабилизатор длины дуги (СДД), выполненный в виде ролика, опирающегося на поверхность изделия и перемещающегося по ней вместе со сварочной горелкой. Горелка в этом случае жестко связана с осью ролика и копирует поверхность изделия.

Существенным недостатком механического СДД является его низкая надежность из-за расположения копирующих устройств вблизи места сварки, т. е. в зоне высоких температур. СДД, как правило, имеют широкую зону нечувствительности. Это объясняется тем, что из-за необходимости сокращения до минимума люфтов в системе копирования она имеет значительные моменты трогания.

Этих недостатков лишены системы стабилизации с электромеханическим исполнительным механизмом. В качестве датчика расстояния от горелки до поверхности свариваемого изделия используются газовые, пневматические или электростатические устройства.

Электростатический датчик основан на изменении емкости воздушного конденсатора, одной из обкладок которого является поверхность свариваемого изделия, а другой — специальный электрод, расположенный над изделием и жестко связанный с горелкой. Конденсатор включается в колебательный контур, и изменения его емкости, пропорциональной расстоянию между обкладками, вызывает изменение резонанасной частоты контура. Это отклонение частоты от заданной используется в качестве управляющего воздействия в системе стабилизации расстояния горелки до поверхности изделия.

Общими недостатками всех систем СДД являются несовпадения места измерения с местом сварки и неучет изменения длины вылета электрода в процессе сварки. Все эти системы нуждаются в предварительной настройке после каждого изменения длины вылета, например в результате перестановки электрода или его расходования. При многопроходной сварке системы СДД должны перестраиваться после каждого прохода. СДД не учитывают местных неровностей под дугой и практически не могут использоваться при многослойной сварке.

СДД применяются обычно при сварке изделий с хорошо обработанной поверхностью (например, труб малой

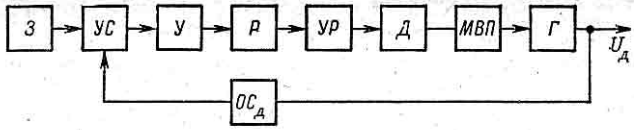


Рис. 6.8. Функциональная схема системы стабилизации напряжения дуги при сварке неплавящимся электродом

толщины), свариваемых за один проход при не очень короткой дуге (более 1 мм).

В современных автоматах, как универсальных, так и специализированных, для стабилизации и регулирования длины дуги применяются автоматические регуляторы напряжения дуги (АРНД). Их работа основана на пропорциональности напряжения дуги длине столба дуги.

Главные требования к исполнительной части АРНД — отсутствие люфтов и малые моменты трогания. С этой целью нагрузку АРНД стремятся уменьшить до минимума: обычно на исполнительном механизме АРНД закрепляется лишь горелка. Важно также уменьшить момент инерции нагрузки, так что компактность расположения нагрузки АРНД, и особенно коммуникаций горелки, имеет большое значение.

Современные АРНД имеют чувствительность до 50 мВ и статическую погрешность 0,1 В (т. е. около 0,1 мм в пересчете на длину дуги при средних токах 100—150 А). Скорость отработки составляет 5—20 мм/с.

Функциональная схема системы стабилизации напряжения дуги при сварке неплавящимся электродом приведена на рис. 6.8.

Сигнал заданного напряжения дуги, поступающий из задатчика *З*, сравнивается в устройстве сравнения *УС* с сигналом обратной связи, поступающим с дуги через блок $ОС_д$. На выходе *УС* появляется сигнал рассогласования, который через усилитель *У* воздействует на регулятор *Р*. Напряжение с регулятора через устройство реверса *УР* подводится к якорю двигателя *Д* механизма вертикального перемещения *МВП*, который в зависимости от значения и полярности сигнала рассогласования перемещает сварочную горелку вверх или вниз, увеличивая или уменьшая тем самым напряжение дуги.

Такие узлы, как *УС*, *У*, *Р*, *УР* в рассмотренной схеме, должны обеспечивать необходимые преобразования и усиление знакопеременного напряжения. Устройство ре-

верса *УР* необходимо для реверса исполнительного двигателя при смене знака управляющего воздействия. При этом оно должно ограничивать токи, действующие во время реверса в цепи якоря исполнительного двигателя, для повышения надежности последнего. Это достигается путем формирования плавно нарастающих фронтов напряжения, подводимого к якорю при реверсе.

На практике в системах АРНД используется как линейный, так и релейный способы управления исполнительным двигателем.

При линейном способе управления напряжение, подводимое к якорю исполнительного двигателя, по значению пропорционально отклонению напряжения дуги от заданного и совпадает с ним по знаку. При релейном способе управления напряжение, подводимое к якорю двигателя, максимально по своему значению и совпадает по знаку с отклонением напряжения дуги от заданного.

Системы с линейным управлением, хотя и более сложные, легко рассчитываются и надежно работают. Релейные системы требуют специальных методов расчета их динамики и введения специальных звеньев в систему для ее устойчивости.

6.10. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО НАПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДА ПО СТЫКУ

Датчики положения стыка. Датчики положения свариваемого стыка являются основным узлом систем автоматического направления электрода по стыку. Именно отсутствие таких датчиков, надежно работающих в промышленных условиях, ограничивает применение систем автоматического направления электрода по стыку и не позволяет повысить уровень автоматизации процессов дуговой сварки. Над созданием датчиков положения стыка работают как в нашей стране, так и за рубежом, однако и сегодня эту проблему нельзя считать решенной. Основными трудностями на пути ее решения являются: высокий уровень электромагнитных помех при дуговой сварке; высокая температура в зоне сварочной дуги; сильная загрязненность и задымленность атмосферы в зоне сварки; высокая интенсивность светового излучения дуги; широкий диапазон допусков на сборку деталей под сварку.

По принципу действия существующие датчики положения стыка можно разделить на механические, электро-

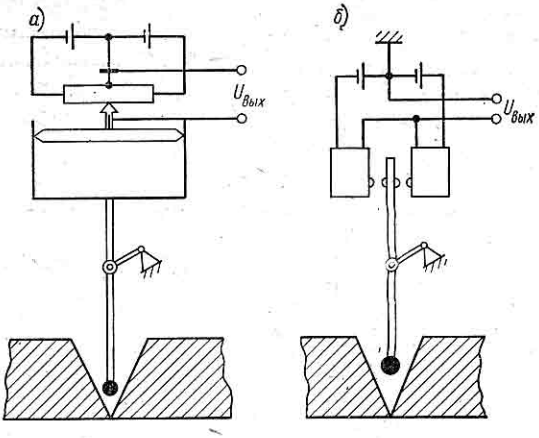


Рис. 6.9. Кинематические схемы электромеханических датчиков: *а* — линейного типа; *б* — релейного типа

механические, электромагнитные, оптические, дуговые, газовые.

Механические датчики представляют собой устройства в виде ролика или силового щупа, движущегося по разделке свариваемых деталей перед сварочной горелкой. Отклонения стыка от предыдущего положения воспринимаются роликом или щупом и через механические связи действуют на горелку, смещая последнюю в нужном направлении. Из принципа работы механических датчиков ясно, что они могут использоваться только при сварке прямолинейных швов с разделкой кромок, а если разделки нет, то по специальной направляющей, параллельной свариваемому стыку. В настоящее время эти датчики практически не применяются.

Электромеханические датчики являются наиболее распространенными. В основе их работы лежит преобразование механического перемещения чувствительного элемента — щупа в электрический сигнал. Это преобразование может быть как линейным, так и релейного типа.

При линейном преобразовании электрический сигнал на выходе датчика по своему значению пропорционален отклонению щупа от нулевого положения, а по знаку соответствует направлению этого отклонения. При релейном преобразовании выходной сигнал датчика меняется скачкообразно по значению и соответствует направлению отклонения щупа от стыка по знаку. На

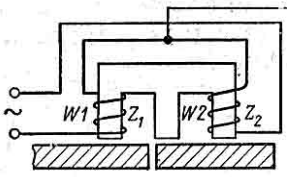


Рис. 6.10. Схема индуктивного электромагнитного датчика

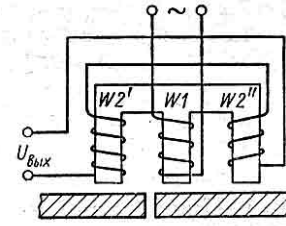


Рис. 6.11. Схема индукционного электромагнитного датчика

рис. 6.9, *а* изображена кинематическая схема датчика линейного типа, а на рис. 6.9, *б* — датчика релейного типа.

При сварке с использованием электромеханических датчиков также требуется либо разделка кромок, либо наличие специальной направляющей, параллельной свариваемому стыку. Корректировка положения сварочной головки при работе с электрическим датчиком осуществляется специальным электроприводом, управляющим сигналом для которого является напряжение с выхода датчика. Поэтому конструкция таких датчиков может быть выполнена в виде малогабаритного компактного узла с безлюфтовыми передачами.

Электромагнитные датчики строятся на принципе изменения соотношения магнитных потоков отдельных участков магнитопровода в зависимости от их магнитного сопротивления. Они делятся на индуктивные и индукционные.

Схема индуктивного электромагнитного датчика приведена на рис. 6.10. Полное сопротивление каждой из обмоток *W1* и *W2* зависит от магнитного потока, замыкающегося через них. Так как магнитный поток обмотки *W1* замыкается через свариваемый стык, то ее сопротивление больше, чем сопротивление обмотки *W2*, магнитный поток которой замыкается через сплошной металл. Эту разность сопротивлений обмоток выявляет специальная схема, подключаемая к датчику, и вырабатывает необходимый управляющий сигнал.

На рис. 6.11 приведена схема индукционного датчика. Этот датчик работает по принципу сравнения ЭДС, наводимых во вторичных обмотках *W2'* и *W2''*. Эти ЭДС равны между собой, когда равны магнитные потоки, замыкающиеся через каждую из обмоток. Так как поток обмот-

ки $W2'$ замыкается через свариваемый стык, то ее ЭДС меньше ЭДС обмотки $W2''$. Напряжение на выходе датчика, равное алгебраической сумме ЭДС обмоток $W2'$ и $W2''$, является управляющим для системы направления электрода по стыку.

Электромагнитные датчики строятся не только по принципу улавливания разности магнитных потоков, но и по принципу измерения индуктивности магнитного поля, образующегося за счет краевого эффекта в зоне стыка. Такие датчики называются датчиками краевого эффекта. Они улавливают своими измерительными катушками разность плотностей магнитных потоков на прилегающих краях свариваемых деталей. Этот принцип позволяет устанавливать датчик на значительном (10—12 мм) расстоянии от свариваемой поверхности, что снижает чувствительность датчика к превышению кромок свариваемых деталей.

Чувствительность электромагнитных датчиков к превышению кромок свариваемых деталей является их основным недостатком. Для устранения этого недостатка разработаны различные варианты датчиков, позволяющих значительно снизить погрешность слежения. Одним из способов уменьшения чувствительности электромагнитных датчиков к превышению кромок является подбор частоты напряжения, питающего катушки датчика. В основе этого способа лежит зависимость фазы векторов напряжения и комплексного сопротивления катушек датчика от частоты питания, смещения стыка и перекоса кромок. Подбором частоты можно обеспечить разделение сигналов от положения стыка и превышения кромок по фазе и с помощью фазочувствительной схемы скомпенсировать погрешность. Существуют и конструктивные способы компенсации влияния превышения кромок.

Оптические датчики работают по принципу воздействия прямого или отраженного светового потока на преобразователь, который преобразует это воздействие в электрический сигнал. Такими преобразователями могут быть фотодиоды, фоторезисторы или приемная телевизионная камера. Оптические датчики работают как по самому свариваемому стыку, так и по специально наносимой параллельно стыку линии. При работе непосредственно по стыку требуется чистота стыкуемых поверхностей деталей и значительная разница восприятия оптикой сплошного металла и стыка. Нанесение специальной линии

для оптического датчика перед сваркой требует дополнительных приспособлений и трудовых затрат, что практически сводит к нулю возможность применения этого метода. Работа оптических датчиков с телевизионными установками является хотя и дорогим, но промышленно реальным способом. Общие недостатки оптических датчиков — слабая защищенность их от световых помех, создаваемых дугой, и низкая чувствительность при работе в условиях задымленности.

В последнее время начали появляться сообщения об использовании сварочной дуги в качестве чувствительного элемента датчика положения стыка. Такой принцип построения датчика вполне реален, так как появилась мощная электронная элементная база, способная с высоким быстродействием обработать большое количество информации, поступающей от дуги. В основе работы современных дуговых датчиков лежит способ измерения и обработки данных о напряжении и токе дуги при ее кратковременном сканировании поперек стыка. Информация в этих системах обрабатывается в цифровом виде с помощью микропроцессорных устройств. Главными преимуществами дуговых датчиков являются пространственное совмещение чувствительного элемента датчика — дуги с самим местом сварки и высокая помехоустойчивость.

Сравнительные данные различных датчиков приведены в табл. 6.4.

Системы автоматического направления электрода по стыку при сварке номинально прямолинейных швов. Номинально прямолинейными называются швы, которые на чертежах изображаются прямыми линиями. Системы автоматического направления электрода по стыку при сварке таких швов используются для компенсации непараллельности направляющих сварочных аппаратов линии стыка.

Как уже отмечалось, все имеющиеся типы датчиков положения стыка, кроме дуговых, не могут быть расположены в зоне дуги и должны быть вынесены вперед по направлению сварки на расстояние от сварочной горелки, определяемое допустимой температурой окружающей среды, при которой может работать датчик. Это расстояние колеблется в пределах 80—300 мм.

Если стык прямолинейный и расположен под некоторым углом к направлению движения сварочного аппарата, то для точного движения электрода по нему необходима

поперечная коррекция. При этом не имеет значения расстояние между датчиком и сварочной горелкой, так как на прямолинейном участке пути угол наклона свариваемого стыка по отношению к направлению движения сварочного аппарата остается постоянным.

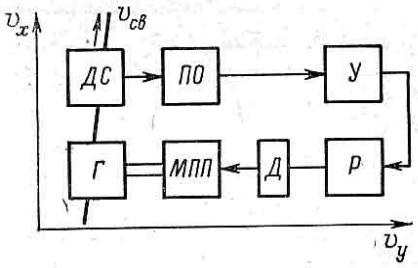


Рис. 6.12. Структурная схема системы автоматического направления электрода по стыку при сварке номинально прямолинейных швов

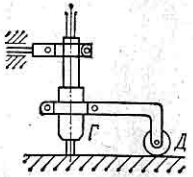
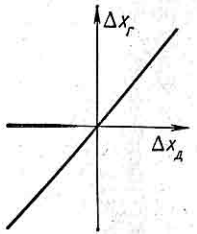
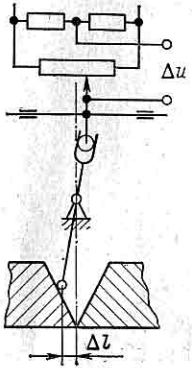
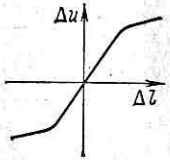
Поперечная коррекция электрода приводит к некоторому отклонению истинной скорости сварки от скорости перемещения аппарата, но при малых углах наклона (менее 20°) это отклонение не превосходит 10 %, что является допустимым.

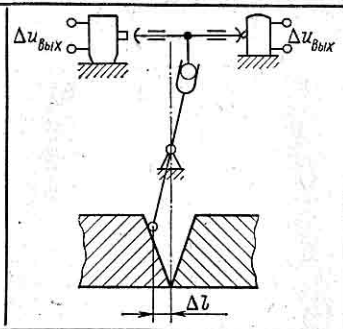
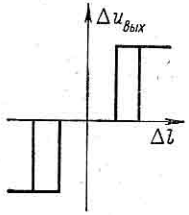
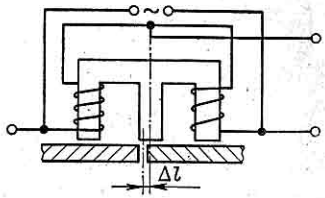
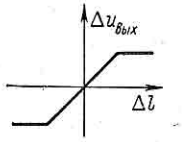
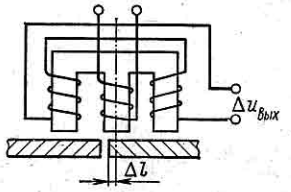
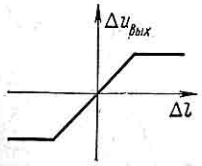
Структурная схема системы автоматического направления электрода по стыку при сварке номинально прямолинейных швов представлена на рис. 6.12. Датчик положения стыка *ДС* при движении сварочного аппарата в направлении v_x отклоняется от своего нулевого положения. Это отклонение преобразуется преобразователем отклонения *ПО* в электрический сигнал, который с выхода преобразователя через усилитель *У* поступает на регулятор *Р*. Регулятор вырабатывает необходимое управляющее воздействие на двигатель *Д*, а последний с помощью механизма поперечного перемещения *МПП* сдвигает сварочную головку *Г* в нужном направлении на необходимую величину.

Приведенная на рис. 6.12 система воздействует на сварочную головку специальным механизмом поперечной коррекции. Это позволяет использовать в системе любой из рассмотренных выше датчиков положения стыка. Можно применять и систему с механическим силовым датчиком.

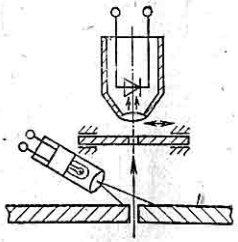
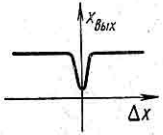
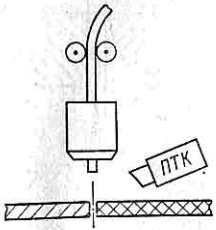
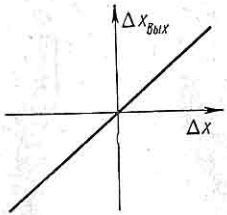
Системы автоматического направления электрода по стыку при сварке криволинейных швов. Автоматизация движения электрода по стыку при сварке криволинейных швов представляет собой сложную задачу из-за невозможности совмещения большинства конструкций датчика положения стыка со сварочной дугой и необходимости введения поэтому в систему блока транспортного

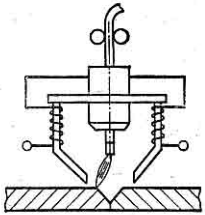
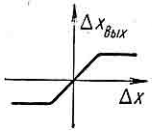
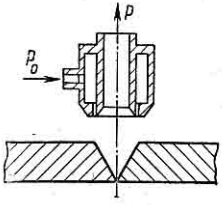
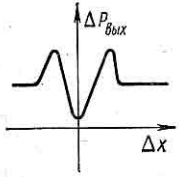
Таблица 6.4

Тип датчиков	Разновидность	Схема	Выходная характеристика	Преимущества	Недостатки
Механические	—			Простота, дешевизна	Низкая точность, возможность работы только по прямолинейным стыкам
Электромеханические	Линейного типа			Простота, удовлетворительная точность	Возможность работы только по разделке или по специальной направляющей

Электромеханические	Релейного типа			Простота, удовлетворительная точность	Возможность работы только по разделке или по специальной направляющей
Электромагнитные	Индуктивные			Высокая точность	Зависимость точности от превышения кромок, слабая помехозащищенность
	Индукционные				

Продолжение табл. 6.4

Тип датчиков	Разновидность	Схема	Выходная характеристика	Преимущества	Недостатки
Оптические	Фотоэлектрические			Высокая точность	Влияние светового излучения дуги, необходимость повышенной чистоты металла в зоне стыка
	Телевизионные				

Дуговые	С измерением параметров дуги			Высокая точность, нет необходимости в блоке транспортного запаздывания	Сложность, дороговизна
	С измерением частоты коротких замыканий				
Газовые	Типа сопло — заслонка			Простота, дешевизна	Низкая точность, нелинейность выходных характеристик
	Струйные				

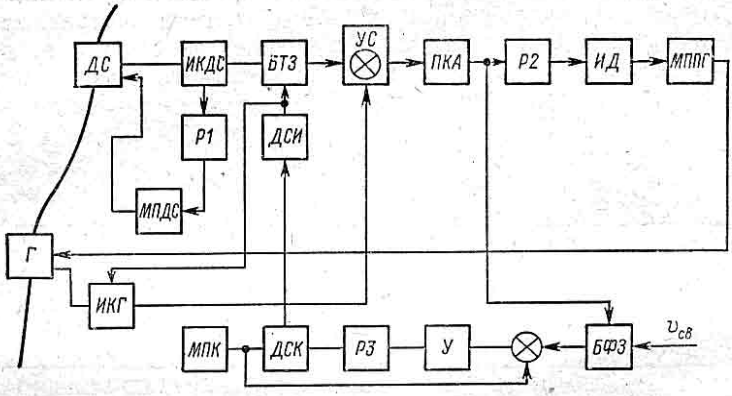


Рис. 6.13. Структурная схема системы автоматического направления электрода по стыку при сварке криволинейных швов

запаздывания. Исключение составляют системы с использованием в качестве чувствительного элемента датчика положения стыка самой дуги. Кроме того, при сварке криволинейных швов с участками большой кривизны необходимо решать задачу стабилизации скорости сварки на криволинейной траектории.

Рассматриваемые системы обязательно требуют раздельных приводов поперечного перемещения датчика положения стыка и сварочной головки, а также запоминающего устройства для запоминания координат точек стыка на время транспортного запаздывания сварочной головки относительно датчика положения стыка.

Структурная схема системы направления электрода по стыку при сварке криволинейных швов со стабилизацией скорости сварки на криволинейной траектории представлена на рис. 6.13. При отклонении датчика стыка *ДС* от своего нулевого положения на его выходе формируется сигнал, который через регулятор *Р1* и механизм поперечного перемещения датчика стыка *МПДС* воздействует на датчик, перемещая его в поперечном направлении до установления на выходе нулевого сигнала.

Положение датчика стыка относительно системы отсчета измеряется измерителем координат датчика стыка *ИКДС*, и эти координаты записываются в блок транспортного запаздывания *БТЗ*. Определение координат датчика стыка и запись их в блок транспортного запаздывания

производятся регулярно по сигналу от датчика синхронизирующих импульсов *ДСИ*. Этот датчик выдает на своем выходе синхроимпульс через определенные, заранее установленные участки пути, проходимого сварочной кареткой. Длина этих участков определяется необходимой точностью воспроизведения траектории и зависит от максимально возможной кривизны.

Блок транспортного запаздывания запоминает координаты датчика положения стыка и при поступлении очередного синхроимпульса продвигает уже записанную информацию на один шаг, а на освободившийся вход записывает координату положения датчика в очередной точке. Координата записывается, как правило, в двоичном коде. Для формирования кода используются либо кодовые датчики положения, либо преобразователи типа аналог — код или код—код.

На выходе блока транспортного запаздывания первый код появится после прохождения датчиком положения стыка пути, равного расстоянию между датчиком и сварочной головкой *Г*. Это расстояние измеряется в системе числом поступивших на блок *БТЗ* синхроимпульсов. При появлении первого кода на выходе блока *БТЗ* сварочная головка будет находиться над точкой начала сварки, т. е. в начале свариваемого стыка. В этот момент возбуждается дуга и начинается сварочный процесс.

Код с выхода блока *БТЗ* поступает на один из входов устройства сравнения *УС*, а на другой его вход поступает код с измерителя координат сварочной головки *ИКГ*. Оба кода на входы устройства сравнения поступают по команде от одного и того же синхроимпульса, т. е. одновременно. В устройстве сравнения производится сравнение кодов, и код разности поступает на преобразователь код—аналог *ПКА*, где преобразуется в аналоговый сигнал, пропорциональный отклонению истинного положения сварочной головки от заданного. Полученный аналоговый сигнал через регулятор *Р2* воздействует на исполнительный двигатель *ИД*, который с помощью механизма поперечного перемещения головки *МППГ* смещает последнюю в нужном направлении до тех пор, пока коды с выхода блока *БТЗ* и с измерителя координат головки *ИКГ* не станут равными, т. е. пока головка не будет находиться над стыком.

Процесс сравнения истинного положения головки с заданным производится по каждому синхроимпульсу, и

поэтому головка повторяет траекторию датчика стыка, т. е. движется по стыку.

Для обеспечения постоянства скорости сварки на криволинейной траектории в систему управления скоростью перемещения сварочной каретки введен блок формирования задания скорости *БФЗ*. Этот блок вырабатывает управляющее воздействие на механизм перемещения каретки *МПК* в зависимости от заданной скорости сварки, фактической скорости, измеренной датчиком скорости горелки *ДСК*, и сигнала, пропорционального отклонению сварочной головки от заданного положения. Сигнал рассогласования, усиленный усилителем *У*, поступает на регулятор *РЗ*, изменяя скорость каретки в нужном направлении. Блок формирования задания *БФЗ* может быть построен как по цифровому, так и по аналоговому принципу.

Рассмотренная система корректирует отклонение сварочной головки от стыка в каждой точке траектории, сравнивая абсолютные значения заданных и истинных координат сварочной головки. Такой принцип построения систем требует сложного оборудования и большого объема памяти в блоке *БТЗ*. Для упрощения подобных систем иногда их строят по принципу запоминания приращения поперечных координат траектории по отношению к предыдущей точке. Недостатком таких систем является возможность накопления ошибки.

Системы программного управления движением сварочной головки по стыку. Системы программного управления движением сварочной головки по стыку находят все более широкое применение при многопроходной сварке, при сварке ряда однотипных изделий, а также при использовании сварочных роботов.

Главное отличие рассматриваемых систем такого рода от применяемых, например, в станках с ЧПУ, состоит в том, что при сварке, кроме точности воспроизведения запрограммированной траектории, необходимы еще и точные расположение и ориентация этой траектории на изделии. Иными словами, траектория движения должна проходить по свариваемому стыку. Эта особенность систем программного управления движением сварочной головки практически однозначно определяет и способ программирования. Этим способом является запись программы в запоминающее устройство при первом проходе или при движении сварочной головки или ее имитатора вдоль

свариваемой траектории без сварки. Такой способ программирования называется обучением системы.

Система программного управления с программированием при первом проходе по своей функциональной схеме практически не отличается от системы для сварки криволинейных швов. Отличием является то, что информационная емкость блока памяти, названного в предыдущей системе блоком транспортного запаздывания *БТЗ*, должна позволять записывать координаты всех точек обучения на всей длине шва, а не только на расстоянии от сварочной головки до датчика положения стыка. Такая система обязательно предполагает наличие датчика положения стыка для обеспечения управления сварочной головкой при первом проходе.

Система с датчиком положения стыка может быть использована и для записи координат без сварки. Наиболее часто обучение системы без сварки осуществляется вручную по базовым точкам траектории с дальнейшим интерполированием этой траектории. Для этой цели в систему программного управления вводится блок линейной или круговой интерполяции. Такое обучение производится на пониженных скоростях движения сварочной головки вдоль траектории с переводом ее из одной точки в другую в режиме ручного управления приводами.

Основным узлом любой системы программного управления является блок памяти. Различается постоянная и оперативная память.

Долговременная память способна хранить записанную программу длительное время даже при снятом с системы управления питающем напряжении. В качестве носителя долговременной памяти в системах программного управления движением сварочной головки по стыку наиболее часто используется магнитная лента или перфолента.

Оперативная память предназначена для хранения информации на короткое время, достаточное для воспроизведения некоторой части траектории движения. Блок оперативной памяти используется как узел, согласующий по времени работу блока долговременной памяти и системы отработки программы. В качестве блоков оперативной памяти используются различные неподвижные запоминающие устройства как статического, так и динамического типа.

С развитием микроэлектроники появилась возможность использовать в системах программного управления микро-ЭВМ, которые не только обеспечивают обучение системы, хранение информации о траектории и отработку программы движения, но и позволяют одновременно управлять некоторыми параметрами сварочного режима.

6.11. АВТОМАТЫ ДЛЯ СВАРКИ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

Промышленность выпускает большое число типов специализированных автоматов для сварки неплавящимся электродом, универсальные автоматы выпускаются в ограниченных количествах.

Типичным универсальным автоматом тракторного типа является автомат АДСВ-6. Автомат предназначен для сварки неплавящимся электродом в аргоне продольных швов изделий. Сварку можно вести на постоянном, пульсирующем и переменном токе до 315 А в зависимости от того, каким источником питания комплектуется автомат. Скорость сварки регулируется в пределах 5—80 м/ч с точностью поддержания этого параметра ± 2 %, скорость присадки диаметром 0,8—2 мм — в пределах 8—120 м/ч с той же точностью стабилизации. Горелка рассчитана на закрепление вольфрамовых электродов диаметром 1—5 мм.

Автомат АДСВ-6 комплектуется унифицированной головкой АСГВ-4. Головка снабжена устройствами АРНД и слежения за линией стыка с помощью индукционного датчика положения стыка. Масса головки 27 кг, ход механизмов ± 50 мм.

Универсальный автомат тракторного типа АДГ-506 предназначен для сварки прямолинейных плоских и пространственных швов. Трактор автомата перемещается по специальной направляющей ленте, входящей в комплект поставки. Сварку можно вести на горизонтальной и вертикальной плоскости, в потолочном положении.

Технические данные автоматов АДГ-506 и АДСВ-6 приведены в табл. 6.5.

Автомат АДГ-506 комплектуется источником питания — выпрямителем ВДУ-506, характеристика которого перестроена для сварки неплавящимся электродом (имеет повышенную крутизну), и возбудителем ВИС-01. Аппаратура управления автомата обеспечивает управление цик-

Таблица 6.5

Параметры	АДГ-506	АДСВ-6
Род сварочного тока	Постоянный	Постоянный и переменный
Номинальный сварочный ток при ПН = 60 %, А	500	315
Пределы регулирования сварочного тока, А	60—500	—
Время импульса, с	0,01—10	—
Время паузы, с	0,01—10	—
Напряжение дуги, В	7—15,9	10—20
Скорость сварки, м/ч	8—50	5—80
Скорость подачи присадочной проволоки, м/ч	10—100	8—120
Диаметр присадочной проволоки, мм	1,0—2,0	0,8—2,0
Диаметр вольфрамового электрода, мм	2—6	1—5
Расход охлаждающей жидкости, л/мин	2—4	2
Расход аргона, л/мин	4—30	4—15
Корректировка электрода поперек шва, мм:		
грубо	±50	—
точно	±20	±50
Перемещение электрода вдоль его оси, мм:		
грубо	±50	—
точно	±20	±50
Поворот горелки в плоскости, проходящей через линию сварки, ...°	0—360	—
Поворот горелки в плоскости, перпендикулярной линии сварки, ...°	0—150	—
Поворот сварочной головки вокруг оси электрода, ...°	0—180	—
Масса трактора (без проводов и кассеты с присадочной проволокой), кг	30	27
Габаритные размеры трактора, мм	600×490×400	450×470×400

лом сварки и сварочным режимом, проведение наладочных операций. В автомате предусмотрены: зажигание дуги возбудителем через зазор на пониженном токе; плавное нарастание сварочного тока после образования дуги; модуляция тока для сварки пульсирующей дугой; автоматическое регулирование напряжения дуги; заварка кратера (спадание тока по линейному закону).

Автомат снабжен безлюфтовыми механизмами для аксиального и поперечного перемещения электрода. Механизм аксиального перемещения используется в системе АРНД; возможно также регулирование положения электрода с ручного пульта. Механизм поперечного перемещения позволяет оператору вести электрод по стыку с ручного пульта.

Каретка трактора с помощью закрепленных на пластинчатой пружине пары опорных роликов и прижимного ролика устанавливается на направляющем поясе, с которым сцепляется ведущий ролик с электродом. Благодаря пружине ролики могут устанавливаться под углом друг к другу и трактор — двигаться по криволинейному направляющему поясу (например, вокруг трубы). На корпусе каретки размещены штанги механизмов поперечного и аксиального перемещения горелки. Внутри корпуса установлен механизм подачи присадочной проволоки с электроприводом.

Так как трактор предназначен для длительной непрерывной работы, горелка снабжена устройством для изменения длины вылета электрода относительно сопла. Горелка имеет насадку со шторками для дополнительной защиты шва, позволяющую вести сварку на сквозняке и при значительной глубине разделки. Горелка и сопло соединены с системой жидкостного охлаждения, подключаемой либо к водопроводной сети, либо к автономной системе охлаждения, поставляемой по особому заказу. В последнем случае вместо воды может использоваться антифриз, и автомат работает при низких температурах (от —10 °С).

Для сварки труб в разнообразных условиях выпускаются автоматы различных типов. Наибольшее распространение получили автоматы типа ОДА (ОДА-1С, ОДА-2С и ОДА-3С) и типа АСТ (АСТ-I и АСТ-II).

Автоматы типа ОДА предназначены для сварки без присадки неповоротных стыков труб диаметром 8—76 мм с толщиной стенки до 3 мм. Они снабжены механизмом

стабилизации длины дуги (СДД); механизмы головки размещены на скобе, приводимой в движение от приводного двигателя с помощью раздаточного шестеренчатого механизма. Особенностью механизма поперечной коррекции является вывод его рукоятки на неподвижную часть, что позволяет осуществлять регулирование по стыку в процессе сварки. Переносные головки автоматов имеют небольшую массу (до 12 кг), малую установочную длину (до 100 мм) и малый радиус вращающихся частей (до 90 мм), позволяющие широко применять их в условиях монтажа.

Автоматы АСТ предназначены для сварки неповоротных стыков труб в монтажных (тип АСТ-II) и цеховых (тип АСТ-I) условиях. В зависимости от материала изделия они комплектуются источниками постоянного (АСТ-IC, АСТ-IT — для стали и титана) и переменного (АСТ-IA) тока.

Автоматы позволяют сваривать трубы диаметром до 220 мм с толщиной стенки до 20 мм. Они снабжены механизмами подачи присадки, АРНД и поперечных колебаний электрода. Для установки на трубу корпус автомата выполнен разъемным.

Для монтажной сварки трубопроводов атомных электростанций разработан ряд малогабаритных автоматов, включающий в себя автоматы АДГ-201 и АДГ-301.

Автомат АДГ-201 (рис. 6.14) предназначен для сварки труб диаметром 57—160 мм. В его состав входят источник питания — установка УДГ-201, аппаратура управления и четыре сменные сварочные головки. Головки имеют общую конструктивную схему. На механизме зажатия эксцентрикового типа размещены электродвигатель, служащий приводом орбитального перемещения, с редуктором и кольцевые направляющие, по которым перемещается планшайба. Зубчатое колесо планшайбы сцеплено с роликом привода орбитального перемещения. Для надевания на трубу колесо имеет откидывающийся сектор. На планшайбе размещены механизмы головки: механизм АРНД со сварочной горелкой, колебатель и механизм подачи присадочной проволоки с кассетой. Головки имеют малую установочную длину (до 90 мм) и малый радиус вращающихся частей (93 мм в головке для сварки труб диаметром до 76 мм и 135 мм в головке для сварки труб диаметром 160 мм), что позволяет вести сварку в затесненных условиях АЭС.

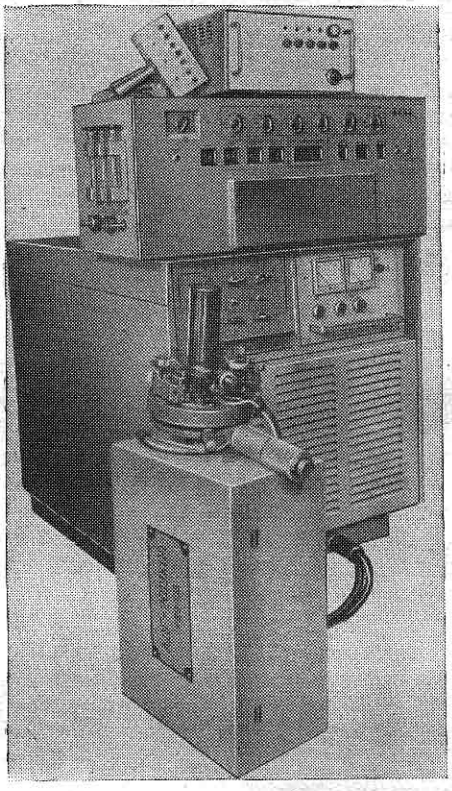


Рис. 6.14. Автомат типа АДГ-201

Автомат АДГ-301 (рис. 6.15) — тракторного типа. Трактор перемещается по направляющему зубчатому колесу, устанавливаемому на трубу. Автомат снабжен кольцами пяти типоразмеров, позволяющими вести сварку труб диаметром 219—1020 мм. На тракторе размещены привод орбитального движения, механизм АРНД, механизм подачи присадочной проволоки (МППП), колебатель и механизм дистанционного управления присадкой.

Автомат АДГ-301 снабжен специальной аппаратурой управления типа АУК-03 на базе микро-ЭВМ, позволяющей либо управлять сваркой с пульта управления,

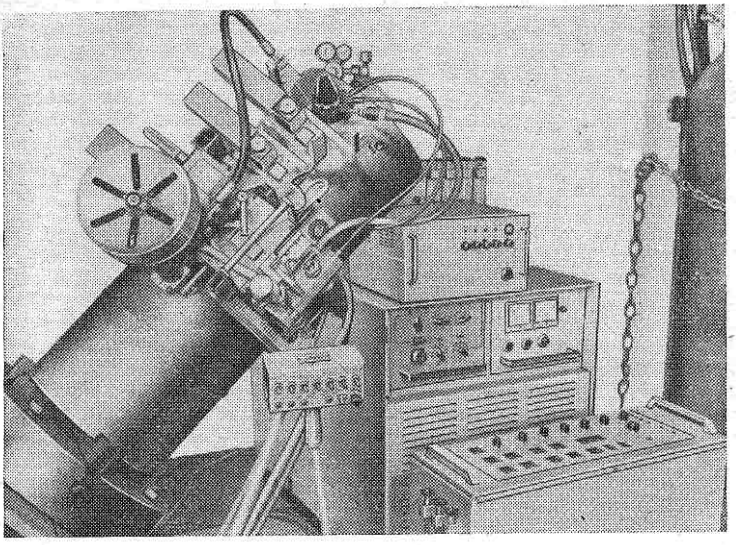


Рис. 6.15. Автомат типа АДГ-301

либо вести сварку по программе, записанной перед сваркой, или по одной из программ, имеющихся в библиотеке (в постоянном запоминающем устройстве — ПЗУ).

6.12. ВЫБОР ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА АРГОНОДУГОВОЙ СВАРКИ

Сварка неплавящимся электродом наиболее часто ведется дугой, горящей между вольфрамовым электродом и изделием в среде инертного газа. Угольные электроды применяются при сварке неответственных соединений. Газ, подаваемый в зону сварки, — аргон, гелий или их смеси, выполняет две функции: он ионизируется, образуя плазму столба дуги, и защищает электрод, сварочную ванну, поверхность шва, конец присадочной проволоки, если она применяется, от окисления и азотирования. Сварка ведется в диапазоне токов от одного до нескольких сотен ампер в зависимости от толщины свариваемого металла.

При сварке неплавящимся электродом энергия, выделяющаяся в сварочной дуге, расходуется на нагрев, плавление и испарение материала изделия, присадочной проволоки, вольфрамового электрода и лучевые потери от столба дуги.

Технологические характеристики процесса сварки вольфрамовым электродом зависят главным образом от рода, полярности и значения сварочного тока, длины дуги, формы и размеров торца вольфрамового электрода.

Сварка постоянным током прямой полярности характеризуется максимальной проплавляющей способностью и применяется для соединения

изделий из малоуглеродистых, углеродистых, легированных сталей, меди, никеля, титана и ряда других металлов и сплавов. Для различных режимов аргонодуговой сварки на постоянном токе прямой полярности в диапазоне токов до 600 А доля тепловой мощности, вводимой в изделие, составляет 40—90 %, потери на нагрев вольфрамового электрода — примерно 5 %, а лучевые потери от столба дуги 7—35 %. Автоматическая сварка на постоянном токе прямой полярности ограниченно применяется также для соединения алюминиевых сплавов. В этом случае процесс сварки выполняется короткой дугой в гелии с погружением конца вольфрамового электрода внутрь сварочной ванны.

Сварка постоянным током обратной полярности применяется для стыковых соединений из алюминиевых сплавов. Потери на нагрев неплавящегося электрода — анода составляют более 50 % общей мощности дуги и в несколько раз превышают долю мощности, затрачиваемую на нагрев вольфрамового электрода — катода, т. е. энергетически сварка током обратной полярности невыгодна. Концентрация нагрева в этом случае ниже, швы имеют меньшую глубину и бо́льшую ширину проплавления, чем при сварке током прямой полярности или переменным током. Преимуществом сварки дугой обратной полярности является то, что катодное пятно постоянно находится на изделии и вследствие катодного распыления происходит эффективное разрушение окисной пленки с обеспечением высокой чистоты поверхности сварочной ванны. Процесс характеризуется высокой стабильностью горения дуги и хорошим сплавлением основного и присадочного металлов даже при нетщательной подготовке поверхности изделия под сварку. Однако значительная тепловая нагрузка на вольфрамовый электрод — анод и опасность попадания материала электрода в шов ограничивают мощность дуги и производительность этого процесса. Как правило, сварка ведется на токах до 150 А. Следует отметить, что низкая концентрация нагрева, блуждание и отклонение столба дуги крайне затрудняют сварку на токе обратной полярности угловых соединений.

Сварка переменным током является наиболее распространенным процессом при изготовлении конструкций из алюминиевых и магниевых сплавов. Очистка окисной пленки происходит в полупериод обратной полярности, когда основной металл является катодом. Так как разогретый вольфрамовый электрод лучше эмитирует электроны, чем алюминий, то возникает разбаланс токов прямой и обратной полярности; он компенсируется схемой управления источника сварочного тока. Компенсация постоянной составляющей сварочного тока обеспечивает условия для полного разрушения окисной пленки. При сварке на больших токах, свыше 300 А, допускается несбалансированный сварочный ток, с небольшим значением постоянной составляющей, что снижает жесткость столба дуги и обеспечивает лучшее сплавление присадочного и основного металлов.

При меньшем значении тока полуволны обратной полярности (50—80 % от полуволны прямой полярности) снижается тепловая нагрузка на вольфрамовый электрод, становится возможным уменьшить его диаметр и обеспечивается лучшее формирование шва при сварке угловых соединений.

Газовая защита при сварке неплавящимся электродом в большинстве случаев осуществляется аргоном. Применение гелия взамен аргона увеличивает проплавляющую способность дуги, устраняет пористость и улучшает формирование шва при высоких скоростях сварки. Высокая стоимость и дефицитность гелия ограничивают его использование. Для повышения тепловой мощности дуги при сварке меди приме-

няется азот. Расход газа, необходимый для получения чистых, качественных швов, зависит от ряда факторов: состава основного и присадочного металлов, формы и размеров сопла, типа соединения и места выполнения сварки (в заводских условиях или на монтаже). На рис. 6.16 приведена ориентировочная зависимость между расходом аргона и сварочным током для ручной сварки стыковых соединений алюминия. Расход аргона линейно увеличивается с ростом сварочного тока.

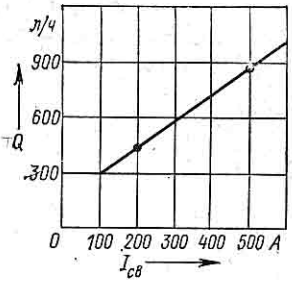


Рис. 6.16. Зависимость между расходом аргона и сварочным током

Газовая защита обратной стороны шва при сварке титана, легированных сталей и никелевых сплавов осуществляется с помощью аргона. Азот используется для защиты обратной стороны шва при сварке меди. При сварке алюминия газовая защита обратной стороны шва обычно не применяется.

Время продувки газа после отключения дуги зависит от значения сварочного тока. Оно выбирается в пределах 5—20 с и должно быть достаточным, чтобы предотвратить окисление поверхности сварочной ванны и торца вольфрамового электрода.

Сварочный ток и скорость сварки определяют необходимое тепловложение и выбираются в зависимости от состава и толщины свариваемого металла. Формирование и размеры шва при сварке неплавящимся электродом зависят от теплового и механического воздействия дуги на сварочную ванну. При сварке на токах до 150 А проплавление достигается главным образом за счет теплопередачи от дуги и конвекции расплавленного металла, влияние же давления дуги незначительно.

Одинаковое проплавление можно получить при изменении сварочного тока и скорости сварки в широких пределах. При увеличении сварочного тока скорость сварки линейно растет. Максимально возможная скорость сварки ограничена в связи с появлением подрезов. Несоответствие между сварочным током и скоростью сварки вызывает чрезмерное проплавление или непровары. Так, листы толщиной 0,35 мм из стали, легированной кремнием (3—4 %), свариваются на медной подкладке в режиме: сварочный ток 50 А, напряжение дуги 10 В, скорость сварки 180 м/ч, расход аргона 15 л/м, диаметр вольфрамового электрода 3 мм, угол заточки 25°. Увеличение сварочного тока на 7 А при той же скорости сварки вызывает увеличение ширины шва от 1,1 до 1,4 мм. Прочность и пластичность шва снижаются. Уменьшение скорости сварки от оптимального значения до 150 м/ч вызывает появление прожогов, а возрастание до 208 м/ч приводит к непроварам. При сварке тонколистовых металлов сварочный ток и скорость сварки (с учетом колебания зазора в стыке до 6 % от толщины металла) должны поддерживаться с точностью до 3 %.

В диапазоне сварочных токов 250—600 А существенную роль в проплавлении и формировании шва играет механическое воздействие дуги.

На рис. 6.17 показано влияние сварочного тока на параметры проплавления и силовое воздействие дуги на сварочную ванну. Зависимости глубины H и ширины B проплавления получены при сварке пластин из стали 1Х18Н9Т толщиной 16 мм со скоростью сварки 10 м/ч; диаметр лантанированного электрода 5 мм, угол заточки 60°, диаметр притупления 2 мм, длина дуги 2 мм, расход аргона 15 л/мин.

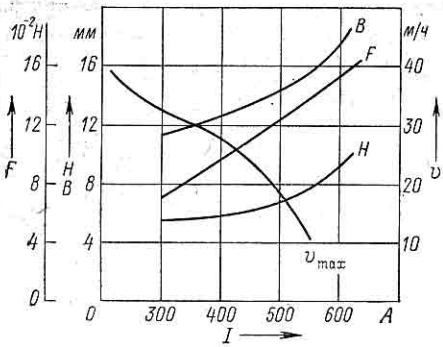


Рис. 6.17. Влияние сварочного тока на параметры проплавления и силовое воздействие дуги

Допустимая скорость сварки v_{max} на токах 300, 400, 500, 600 А определялась по характеру формирования сварочной ванны и наличию дефектов в шве, которые выявлялись внешним осмотром, рентгеноконтролем и анализом макрошлифов.

Увеличение сварочного тока от 300 до 600 А приводит к линейному возрастанию силового воздействия дуги F с $6 \cdot 10^{-2}$ до $15 \cdot 10^{-2}$ Н. В связи с этим столб дуги углубляется в расплавленный металл, в результате чего уменьшается прослойка жидкого металла под дугой и улучшаются условия теплопередачи в основной металл. Однако глубина проплавления H увеличивается всего лишь на 40—80 %, а ширина B возрастает почти в два раза. Медленный рост проплавляющего действия дуги связан с тем, что с увеличением сварочного тока одновременно растет диаметр столба дуги и расширяется пятно нагрева, а плотность теплового потока меняется незначительно.

Область хорошего формирования швов ограничена кривой максимально допустимой скорости сварки v_{max}. В диапазоне токов до 400 А допустимая скорость сварки снижается плавно, а в диапазоне токов 400—500 А резко падает вниз. При скоростях сварки ниже критической шов формируется равномерно, расплавленный металл заполняет шов по всей ширине. Если скорость сварки превышает допустимую, наблюдается периодическое нависание верхних слоев расплавленного металла над кратером сварочной ванны и захлестывание газов столба дуги с образованием газовых полостей в швах. В корневой части шва иногда образуются непрерывные газовые каналы. Вероятность появления этих дефектов шва снижается при использовании гелия вместо аргона, уменьшении длины дуги или увеличении угла заточки вольфрамового электрода.

Так как увеличение глубины проплавления за счет повышения сварочного тока при аргонодуговой сварке сталей связано с ограничением допустимой скорости сварки и необходимостью поддержания параметров режима с высокой точностью, то стыковые соединения толщиной свыше 4 мм, как правило, выполняются с разделкой кромок.

Длина дуги является одним из основных параметров, влияющих на формирование шва и проплавляющую способность дуги. Она выбирается в зависимости от типа соединения, марки и толщины свариваемого металла. Для сварки без присадочной проволоки длина дуги устанавливается в пределах 0,5—2 мм, а при использовании присадочной проволоки длина дуги может быть увеличена до 3—4 мм. Сварка в различных пространственных положениях обычно выполняется при минимально возможной длине дуги с целью сокращения объема сварочной ванны и улучшения ее формирования. С удлинением дуги линейно растет напряжение дуги, увеличиваются ее диаметр и пятно нагрева. Зависимость глубины проплавления от длины дуги не является постоян-

Таблица 6.6

Марка	Номинальный диаметр, мм	Длина, мм
ЭВЧ	0,5 1,0; 1,6; 2,0; 2,5 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0	Не менее 3000 в мотках 75±1; 150±1 200±2; 300±2
ЭВЛ	1,0; 1,6; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0 5,0; 6,0; 8,0; 10,0	75±1; 150±1 200±2; 300±2
ЭВИ-1	2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0 8,0; 10,0	75±1; 150±1 200±2; 300±2
ЭВИ-2 ЭВИ-3	2,0; 3,0; 4,0 5,0; 6,0; 8,0; 10,0	75±1; 150±1 200±2; 300±2
ЭВТ-15	2,0; 3,0; 4,0; 5,0 6,0; 8,0; 10,0	75±1; 150±1 200±2; 300±2

ной и в значительной степени определяется технологическими условиями сварки. Как правило, глубина проплавления несколько уменьшается при увеличении длины дуги, а ширина шва во всех случаях интенсивно возрастает. При сварке кипящей стали и некоторых алюминиевых сплавов на токах свыше 300 А длину дуги иногда увеличивают до 5 мм, чтобы предотвратить кипение ванны и интенсивное плавление электрода.

Стабильность проплавления при сварке длинными, свыше 4 мм, дугами снижается вследствие того, что уменьшается жесткость столба дуги и возможны отклонения и искривления его. Случайные отклонения столба дуги возникают в результате магнитного дутья у края пластины или вызываются электромагнитными силами, возникающими в результате взаимодействия сварочного тока с током в изделии, направление которого зависит от расположения токоподвода. При сварке длинными дугами ухудшается эффективность газовой защиты.

Постоянство параметров проплавления при автоматической сварке обеспечивается поддержанием заданной длины дуги с точностью до 3 %.

Выбор вольфрамового электрода. Применяемые вольфрамовые электроды должны отвечать требованиям ГОСТ 23949—80 «Электроды вольфрамовые сварочные неплавящиеся. Технические условия».

Для сварки в среде инертных газов применяются электроды диаметром 0,5—10 мм из чистого вольфрама (ЭВЧ), вольфрама с присадкой двуокиси тория (ЭВТ), вольфрама с присадкой окиси лантана (ЭВЛ), вольфрама с присадкой окиси иттрия (ЭВИ).

Размеры электродов и их предельные отклонения должны соответствовать указанным в табл. 6.6.

Пример условного обозначения электрода марки ЭВЛ диаметром 2,0 мм, длиной 150 мм:

«Электрод вольфрамовый ЭВЛ-∅2-150—ГОСТ 23949—80».

Таблица 6.7

Марка электрода	Цвет	Марка электрода	Цвет
ЭВЧ	Не маркируется	ЭВИ-2	Фиолетовый
ЭВЛ	Черный	ЭВИ-3	Зеленый
ЭВИ-1	Синий	ЭВТ-15	Красный

Каждый электрод должен быть маркирован в соответствии с табл. 6.7. Электроды диаметром 3,0 мм и более допускается маркировать снятием фасок 1 мм × 45° или рисок. Маркировка должна быть нанесена на одном из концов электрода. Маркировка может быть нанесена на торец в виде полосы или точки на поверхности у торца на длине 5—10 мм.

Различные марки электродов имеют специфические особенности, которые необходимо учитывать при их выборе для конкретных условий сварки.

Эрозия вольфрамовых электродов в большой мере зависит от рода и значения сварочного тока, марки электрода, эффективности его охлаждения и условий газовой защиты. Если охлаждением электрода при данном значении сварочного тока поддерживается температура, при которой термоэмиссия электронов достаточна для обеспечения потребной плотности тока, то эрозия в этом случае минимальная. При переохлаждении электрода увеличиваются доля ионного тока между электродом и плазмой столба, тепловой поток в тело электрода, а вместе с ним и эрозия. При аргонодуговой сварке на токах до 500 А удельный расход вольфрама колеблется в зависимости от технологических условий в пределах $1 \cdot 10^{-8}$—$8 \cdot 10^{-6}$ г/(А·с). Поэтому вопрос о выборе оптимального теплового режима вольфрамового электрода является весьма важным.

Зависимость между максимально допустимым сварочным током $I_{св}$ в амперах и диаметром электрода $d_э$ в миллиметрах при сварке на постоянном токе прямой полярности выражается следующей эмпирической формулой:

$$I_{св} = 65 \cdot d_э^{3/2}. \qquad (6.1)$$

В табл. 6.8 приведены значения сварочных токов для различных типов и диаметров электродов при аргонодуговой сварке. Допустимые токи для других марок электродов находятся в пределах этого диапазона токов.

Электроды из чистого вольфрама применяются для сварки на переменном токе алюминия и его сплавов. Конец вольфрамового электрода в этом случае оплавляется с образованием полусферы на торце. При сварочном токе ниже допустимого значения образуются шарообразные капли, которые перемещаются по торцу электрода и периодически срываются в столб дуги. Максимальное значение сварочного тока ограничивается в связи с образованием чрезмерно большой капли расплавленного вольфрама, которая затрудняет процесс сварки. Электроды из чистого вольфрама могут быть использованы и при сварке на постоянном токе, однако токовая нагрузка должна быть снижена по сравнению с торированными или лантанированными электродами.

Таблица 6.8

Диаметр электрода, мм	Постоянный ток прямой полярности, А	Постоянный ток обратной полярности, А	Переменный ток без постоянной составляющей, А
	Вольфрам чистый		
1,0	15—60	—	15—20
1,6—2,0	200—100	—	20—60
3,0	80—250	25—40	60—150
4,0	200—360	40—50	120—200
5,0	350—550	50—80	180—300
6,0	500—700	80—125	250—340
	Вольфрам иттрированный ЭВИ-3		
1,0	25—85	—	20—40
3,0	80—350	25—40	60—200
4,0	200—500	40—50	120—250
5,0	400—750	50—80	180—300
6,0	450—900	80—125	280—500
8,0	600—1200	—	350—650

В состав активизированных электродов введены добавки двуокиси тория, либо окиси лантана, либо окиси иттрия 1—3,5 %. Это усиливает эмиссионные свойства электродов, улучшает зажигание дуги в диапазоне малых токов, увеличивает примерно на 30—50 % допустимый сварочный ток. Торированные или лантанированные электроды, как правило, применяются для сварки на постоянном токе прямой полярности с заточкой электрода на конус с высотой, равной 2—3 диаметрам электрода. Острая заточка электрода исключает блуждание катодного пятна по поверхности электрода.

Иттрированные вольфрамовые электроды обеспечивают максимальную токовую нагрузку по сравнению с другими типами вольфрамовых электродов. Они рекомендуются для сварки как на переменном, так и на постоянном токе.

Боковая поверхность и конец электрода при правильном выборе параметров режима сварки и размеров электрода должны блестеть. Матовая поверхность означает, что тепловая нагрузка на электрод превышает рекомендуемую. Если поверхность электрода после сварки приобретает синий, черный цвет или имеет зеленый налет, это означает, что расход аргона недостаточен или время продувки аргона после отключения дуги мало.

При длительной работе вольфрамового электрода на его рабочей поверхности у торца образуются наросты окислов вольфрама, так называемые коронки, которые могут приводить к произвольному перемещению катодного пятна и блужданию дуги по поверхности сварочной ванны. Вероятность образования «коронки» уменьшается при интенсивном охлаждении электрода и улучшении газовой защиты.

Заточка вольфрамовых электродов должна производиться твердыми дисками с мелким зерном для избежания образования заусенцев и бороздок на торце электрода. Круг, на котором затачиваются вольфрамо-

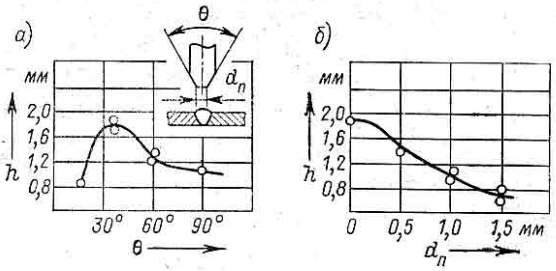


Рис. 6.18. Влияние угла заточки (*а*) и диаметра притупления (*б*) электрода на высоту обратного валика

вые электроды, не должен применяться для других материалов, чтобы исключить попадание загрязнений.

Диаметр притупления вольфрамового электрода (катода) и угол заточки влияют на проплавляющую способность дуги. В работе [14] показано, что при уменьшении диаметра притупления повышается концентрация теплового потока, растет давление дуги и плотность тока. Глубина проплавления монотонно увеличивается при уменьшении диаметра притупления электрода.

Изменение угла заточки приводит к изменению формы и размеров столба дуги. При углах заточки 15—75° столб имеет коническую форму, при бо́льших углах форма столба дуги приближается к цилиндрической, а пятно нагрева сокращается.

На рис. 6.18 показано влияние угла заточки θ и диаметра притупления $d_п$ вольфрамового электрода на высоту обратного валика h при сварке пластин из нержавеющей стали толщиной 5,2 мм с полным проплавлением стыка на весу. Режим сварки: сварочный ток 210 А, скорость сварки 8,64 м/ч, длина дуги 1,0 мм, диаметр лантанированного вольфрама 4,0 мм. Наиболее интенсивно, более чем в два раза, растет высота обратного валика с увеличением угла заточки от 20 до 45°, а затем снижается.

При увеличении диаметра притупления от 0 до 1,5 мм высота обратного валика снижается вдвое, ширина проплавления увеличивается на 30—50 %. При сварке вольфрамовым электродом, имеющим притупление, вероятность появления непровара из-за несоосности электрода и линии стыка снижается.

На практике используются вольфрамовые электроды с заточкой под углом 20—90°. При меньших углах снижается ресурс работы электрода, а при углах свыше 90° возможно неустойчивое горение дуги из-за блуждания катодного пятна по торцевой поверхности.

6.13. ТЕХНИКА И РЕЖИМЫ СВАРКИ

Аргонодуговая сварка вольфрамовым электродом применяется для стыковых, угловых, нахлесточных соединений в различных пространственных положениях. Форма подготовки кромок зависит от толщины соединяемых

элементов и возможности производить сварку с одной или двух сторон. Стыковые соединения стали толщиной до 3—4 мм, а алюминия толщиной до 5—6 мм свариваются без скоса кромок. Проплавление корня шва стыкового соединения с разделкой кромок обычно осуществляется без присадочной проволоки, затем разделка заполняется расплавленным металлом за необходимое число проходов с подачей присадочной проволоки. В некоторых случаях присадочная проволока подается при выполнении корневого прохода, например при сварке металлов, склонных к растрескиванию, когда для избежания образования вогнутой поверхности шва добавляется присадочный металл. Или, например, при сварке кипящей стали применяется присадка, содержащая раскисляющие элементы, для исключения пористости шва. Соединение жидкотекучих металлов, например алюминия, меди, магния и их сплавов, рекомендуется производить в нижнем положении. При необходимости ведения процесса на вертикальной плоскости шов следует выполнять сверху вниз для толщин до 5 мм и снизу вверх для бóльших толщин. В этих случаях сварку рекомендуется выполнять одновременно с двух сторон. При использовании такого приема можно сваривать встык элементы из алюминиевого сплава толщиной до 16 мм.

Сварка горизонтальных стыков швов на вертикальной плоскости и потолочных стыков швов затруднена из-за вероятности вытекания расплавленного металла из сварочной ванны, поэтому их следует избегать; там, где избежать таких швов нельзя, их выполняют с разделкой кромок в несколько проходов.

Ручная сварка угловых соединений алюминиевых сплавов толщиной до 5 мм выполняется с двух сторон без разделки кромок с применением присадочной проволоки.

Односторонняя сварка соединений с внутренним углом при толщине элементов 4—8 мм часто производится без разделки кромок в два прохода. Первый проход выполняется при повышенном токе без присадочного металла, при этом достигается глубокое проплавление соединения. Второй проход — с подачей присадочной проволоки.

Возбуждение дуги следует производить с помощью осциллятора или уменьшенным до 7—10 А током зажигания. При ручной сварке алюминия в случае отсутствия осциллятора дуга должна зажигаться на угольной или медной пластине. При сварке труб с разделкой кромок

дуга возбуждается в разделке или на ранее наплавленном металле шва. Зажигание дуги на свариваемом металле вне разделки не допускается.

В месте начала шва необходимо разогреть кромки свариваемых элементов, плавно перемещая дугу на небольшом участке. Присадочная проволока вводится после образования сварочной ванны.

В ряде случаев присадочная проволока вводится в сварочную ванну возвратно-поступательными движениями небольшими порциями или с применением серповидных колебательных движений поперек шва. Это обеспечивает благоприятные условия для перемешивания и сплавления присадочного материала с основным. В процессе сварки необходимо следить, чтобы разогретый конец присадочной проволоки находился внутри потока защитного газа. Погружая проволоку в сварочную ванну, нужно одновременно слегка отводить от ванны конец вольфрамового электрода. Подача проволоки и отвод конца вольфрамового электрода должны выполняться плавно, без резких движений, могущих нарушить истечение защитной струи аргона. При ручной сварке тонких элементов горелку рекомендуется перемещать справа налево. Ось вольфрамового электрода отклоняется от вертикали на угол 10—30° в сторону, противоположную направлению сварки. Присадочная проволока подается впереди столба дуги в переднюю часть ванны под углом 5—20° к поверхности свариваемого металла. При механизированной сварке сталей этот угол может быть увеличен до 35—55°. Не следует вводить конец присадочной проволоки в столб дуги, где под действием высокой температуры она интенсивно плавится и разбрызгивается.

Для соединения металлов больших толщин, особенно алюминия и его сплавов, рекомендуется применять правый способ ручной сварки, так как в этом случае обеспечивается удобство наблюдения за процессом и лучшее перемешивание присадочного и основного металлов.

При сварке угловых соединений элементов одинаковой толщины продольная ось вольфрамового электрода должна совпадать с биссектрисой угла между стенкой и полкой. Присадочная проволока должна находиться в одной плоскости с вольфрамовым электродом. Для механизированной сварки применяется присадочная проволока диаметром 1—2,5 мм. При ручной сварке диаметр проволоки может быть увеличен до 5 мм.

Нельзя допускать касания торцом вольфрамового электрода расплавленной ванны жидкого металла. Если касание происходит, сварка должна быть прекращена, а загрязненный участок шва должен быть зачищен или вырублен. Торец вольфрамового электрода следует зашлифовать и прожечь, возбудив дугу на вспомогательном медном элементе. После вынужденного обрыва дуги сварку возобновляют на расстоянии не менее 10—15 мм до обрыва, не допуская заметного усиления шва.

Кратеры швов должны быть тщательно заплавлены. Гашение дуги должно производиться путем постепенного уменьшения сварочного тока. Время снижения сварочного тока не менее 5 с. К моменту обрыва дуги сварочный ток должен быть снижен до значения, исключающего возникновение дефектов в шве.

При выполнении однослойного стыкового шва или первого слоя многослойного стыкового шва должно быть обеспечено полное проплавление с образованием проплава с обратной стороны шва. Обратный валик формируется на весу или с помощью подкладок.

Подкладка обычно выполняется с продольной канавкой глубиной 0,5—2,0 мм и шириной 3—20 мм. Подкладки изготовляются из меди в случае сварки сталей и жаропрочных сплавов, при сварке алюминиевых и титановых сплавов — из нержавеющей стали. В ответственных случаях, где загрязнения медью недопустимы, используются подкладки из того же материала, что и изделие, или керамические материалы.

Газ для защиты обратной стороны шва подается через отверстия в подкладке. Газовая защита обратной стороны шва при сварке труб осуществляется с помощью заглушек, располагающихся по обе стороны от стыка. С обратной стороны шва не должно создаваться чрезмерного давления газа на сварочную ванну во время сварки или к концу ее, так как это может привести к образованию вогнутого обратного валика или даже выдуванию сварочной ванны.

Сборка конструкций осуществляется с применением оснастки, обеспечивающей выравнивание кромок, устранение зазоров и прижатие кромок к подкладке. Размеры свариваемых элементов и допуски на них, а также сборка их под автоматическую сварку зависят от толщины металла. Так, зазор в стыке и смещение кромок не должны быть более 10 % при толщинах свариваемого металла до 1 мм и не более 15 % при толщинах свариваемого металла

Таблица 6.9

Толщина алюминия, мм	Расстояние между прижимами, мм	Усилие прижима, Н/см
До 1,0	4—8	100—150
1—3	6—10	150—200
3—8	10—15	200—300

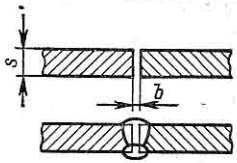
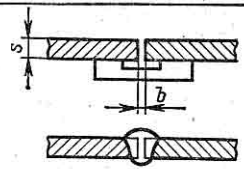
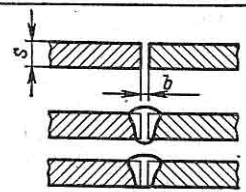
свыше 1 мм. В зажимных приспособлениях клавишного типа усилие поджатия кромок и расстояние между прижимами должны выбираться в соответствии с табл. 6.9.

Ориентировочные режимы ручной и автоматической сварки стали 1Х18Н9Т приведены в табл. 6.10. Ориентировочные режимы ручной сварки алюминиевых сплавов — в табл. 6.11. Ориентировочные режимы автоматической сварки алюминиевых сплавов — в табл. 6.12. В табл. 6.13 даны ориентировочные режимы ручной аргонодуговой сварки титана встык без разделки кромок за один проход. Сварка выполняется горелкой, имеющей козырек длиной 60—100 мм для дополнительной газовой защиты остывающего

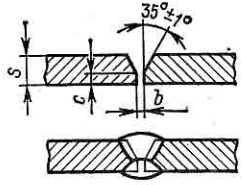
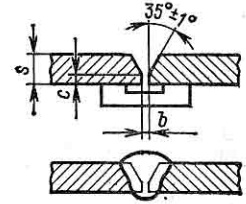
Таблица 6.10

Форма кромок	Толщина металла, мм	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч	Диаметр присадочной проволоки, мм	Примечание
Ручная сварка						
Без скоса V-образные	2,0	80—100	10—11	—	1,2—1,6	—
	4,0	60—90 (1-й проход)	10		—	
		60—90 (2-й проход)	10—11		1,6—2,0	
Автоматическая сварка						
Без скоса	1,0	50—100	9—10	30—60	—	Расход аргона 5—10 л/м
	1,5	75—150	9—10	14—50		Диаметр вольфрамового электрода 3 мм
	2,5	110—200	10	12—21		Ток постоянный прямой полярности

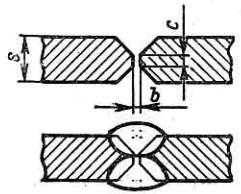
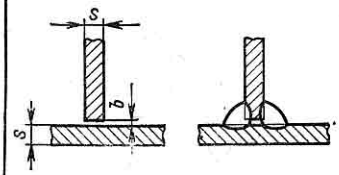
Таблица 6.11

Подготовка кромок свариваемых деталей и форма выполнения шва	s, мм	b, мм	c, мм	Режим сварки				
				Сила тока, А	Диаметр вольфрамового электрода, мм	Диаметр присадочной проволоки, мм	Расход аргона, л/мин	Число проходов
	2	$0^{+1,0}$	—	70—80	2	2—2,5	5—6	2
	3	$0^{+1,5}$		100—140	3	3	7—8	
	4	$0^{+2,0}$		160—190	4	3—4	7—8	
	2	$0^{+1,0}$	—	80—100	3	2,5—3,5	5—6	1
	3		—	120—140		3	7—8	
	2		—	80—100	2	2,5—3,5	5—6	1
	3			120—140	3	3	7—8	1
	4			160—210	4	4	7—8	2

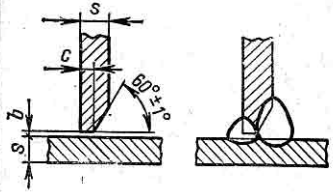
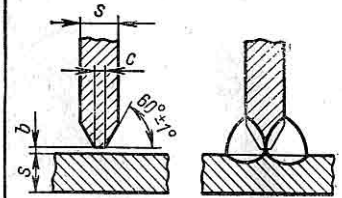
Продолжение табл. 6.11

Подготовка кромок свариваемых деталей и форма выполнения шва	s, мм	b, мм	c, мм	Режим сварки				
				Сила тока, А	Диаметр вольфрамового электрода, мм	Диаметр присадочной проволоки, мм	Расход аргона, л/мин	Число проходов
	4	$0^{+1,0}$	$1,0^{+0,5}$	150—200	6	3—4	7—8	1
	6		$1,0^{+1,0}$	250—300	5	4	8—9	2
	8		$1,0^{+1,0}$	300—350	5—6	4—5	9—10	
	10		$1,0^{+1,0}$	350—400	6—7	4—5	10—12	
	4	$1,0^{+1,0}$	$1,0^{+0,5}$	220—260	4	3—4	8—10	1
	6	$1,5^{+1,0}$	$1,0^{+1,0}$	260—300	4—5	4	10—12	2
	8	$2,0^{+1,0}$	$1,0^{+1,0}$	320—360	5—6	4	12—14	
	10	$2,0^{+1,0}$	$1,0^{+1,0}$	380—420	6—7	4—5	16—18	
	15	$2,5^{+1,0}$	$1,0^{+1,0}$	440—480	8	4—5	16—18	

Продолжение табл. 6.11

Подготовка кромок свариваемых деталей и форма выполнения шва	s, мм	b, мм	c, мм	Режим сварки				
				Сила тока, А	Диаметр вольфрамового электрода, мм	Диаметр присадочной проволоки, мм	Расход аргона, л/мин	Число проходов
	10	$0^{+1,0}$	$1,0^{+0,5}$	350—400	6—7	4—5	10—12	4
	15	$0^{+1,5}$		380—420	7		16—18	6
	20	$0^{+1,5}$		480—550	8		18—20	
	2	$0^{+0,5}$	—	100—120	2—3	2	5—6	2
	4	$0^{+1,0}$		170—220	4	3—4	7—8	
	6	$0^{+1,5}$		240—280	5	4	8—10	

Продолжение табл. 6.11

Подготовка кромок свариваемых деталей и форма выполнения шва	s, мм	b, мм	c, мм	Режим сварки				
				Сила тока, А	Диаметр вольфрамового электрода, мм	Диаметр присадочной проволоки, мм	Расход аргона, л/мин	Число проходов
	4	$0^{+1,0}$	$0,5^{+0,5}$	170—220	4	4	8—10	2
	10	$0^{+1,5}$	$1,0^{+0,5}$	350—400	6—7	4—5	10—12	
	15	$0^{+2,0}$	$1,5^{+0,5}$	380—420	7	4—5	16—18	
	8	$0^{+1,0}$	$0,5^{+0,5}$	280—320	5—6	4	8—10	
	10	$0^{+2,0}$	$1,0^{+0,5}$	350—400	6—7	4—5	10—12	
	15	$0^{+2,0}$	$1,5^{+0,5}$	380—420	7	4—5	16—18	
	20	$0^{+2,0}$	$1,5^{+0,5}$	480—550	8	4—5	18—20	5

Продолжение табл. 6.11

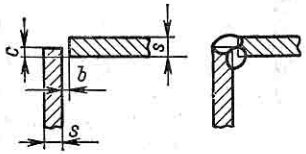
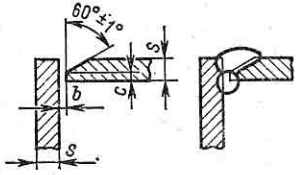
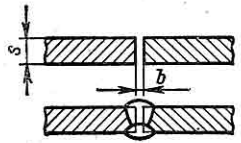
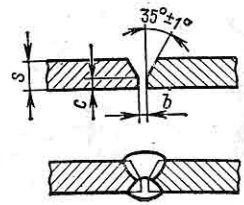
Подготовка кромок свариваемых деталей и форма выполнения шва	s, мм	b, мм	c, мм	Режим сварки				
				Сила тока, А	Диаметр вольфрамового электрода, мм	Диаметр присадочной проволоки, мм	Расход аргона, л/мин	Число проходов
	2 4 6	$0^{+0,5}$ $0^{+1,0}$ $0^{+1,5}$	$0^{+1,0}$	100—120 150—200 220—260	2—3 4 5	2—3 3 4	5—6 8—10 8—10	2
	4 10	$0^{+1,0}$ $0^{+1,5}$	$0,5^{+0,9}$ $1,0^{+0,9}$	150—200 320—380	4 6—7	3—4 4—5	8—10 10—12	2
	15	$0^{+2,0}$	$1,5^{+0,5}$	360—400	7	4—5	16—18	3

Таблица 6.12

Подготовка кромок свариваемых деталей и форма выполнения шва	s, мм	b, мм	c, мм	Режим сварки						
				Сила тока, А	Диаметр электрода, мм	Диаметр проволоки, мм	Скорость сварки, м/ч	Скорость подачи проволоки, м/ч	Расход аргона, л/мин	Число проходов
	2—3 4	$0^{+1,0}$	—	120—150 200—220	3—4 4—5	2	15—25 15—20	90—100 75—90	6—9 16—18	2
	4 6 8—10		$1,0^{+0,5}$ $1,0^{+1,0}$ $1,0^{+1,0}$	150—200 250—300 370—400	4—5 5—7 7—8	2 2—3 2—3	12—18 12—18 10—16	90—100	10—14 14—18 16—20	2

Продолжение табл. 6.12

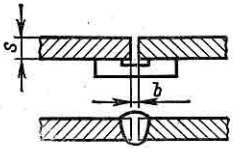
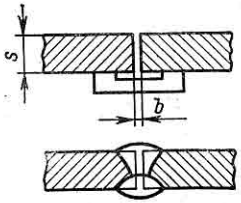
Подготовка кромок свариваемых деталей и форма выполнения шва	s, мм	b, мм	c, мм	Режим сварки						
				Сила тока, А	Диаметр электрода, мм	Диаметр проволоки, мм	Скорость сварки, м/ч	Скорость подачи проволоки, м/ч	Расход аргона, л/мин	Число проходов
	2—3 4 6	$0^{+1,0}$	—	130—170 240—280 280—320	3—4 5 6	2 2—3 2—3	20—25 15—20 15—20	75—100	6—10 10—15 10—15	1
	8—10	$1,0^{+1,0}$	—	370—420 340—380	7—8	2—3	10—15	90—100	15—20	2

Таблица 6.13

Толщина металла, мм	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Диаметр присадочной проволоки, мм	Расход аргона, л/мин, для защиты	
				шва	обратной стороны шва
0,5	25—35	8—10	1,0—1,2	5—6	2
0,8 1,0	40—50 50—60		1,0—1,6	6—7 6—8	2—3
1,5	70—90	9—11	1,6—2,0	7—8	
2,0	90—100	11—13		8—10	2—4
2,5 3,0	110—120 120—140			10—12	

Таблица 6.14

Толщина металла, мм	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч	Расход аргона, л/мин
0,8 1,0	60—80 70—100	8—10 9—11	25—35	5—8 6—8
1,5	120—150	10—12		7—9
2,0	160—200			25—30
2,5	190—240	11—13		
3,0	280—300		25—30	9—11

шва. О качестве защиты можно ориентировочно судить по цвету шва. При хорошей газовой защите поверхность шва имеет серебристый цвет. При насыщении газами ее цвет изменяется от светло-желтого до серого.

В табл. 6.14 приведены ориентировочные режимы однопроходной автоматической аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом титана встык без разделки кромок и присадочной проволоки. Сварка выполняется на медной

Таблица 6.15

Толщина, мм	Зазор между кромками, мм	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч	Температура подогрева, °С	Расход газа, л/мин	Число проходов
			Аргонодуговая сварка				
2	0—0,5	100—120	10—14	25—30	—	10—12	1
3	0,5—1,0	200—220	11—15	25—30	—	12—14	1
4	1,0—1,5	380—400	12—16	30—35	300—400	12—14	2
			Азотнодуговая сварка				
2	0—0,5	70—90	20—24	20—22		16—18	1
3	0,5—1,0	120—140	22—26	20—22	—	18—20	1
4	1,0—1,5	180—200	24—28	18—20		18—20	2
6		260—280	26—30	16—18		20—22	3
8	1,0—1,5	380—400	30—35	12—14	400—600	20—22	6
10		400—420	31—36	12—14		22—24	6

подкладке с глубиной паза до 2 мм, расход аргона на поддув со стороны корня шва 2—3 л/мин.

В табл. 6.15 приведены ориентировочные режимы автоматической сварки меди встык с присадочной проволокой из бронзы БрКМц3-1. Медь толщиной до 4 мм свариваются без разделки кромок, а при толщине 6—10 мм — с V-образной разделкой кромок с углом раскрытия 70—90° и притуплением 1,5—2,0 мм.

6.14. РАЗНОВИДНОСТИ АРГОНОДУГОВОЙ СВАРКИ ВОЛЬФРАМОВЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

Для расширения диапазона свариваемых толщин, увеличения производительности аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом и повышения постоянства провара разработано несколько вариантов процесса, таких, как сварка пульсирующим током; с подогреваемой присадочной проволокой; несколькими вольфрамовыми электродами; заостренным катодом; проникающей дугой и др. Эти разновидности процесса могут быть реализованы с применением стандартного оборудования или в сочетании с дополнительными узлами и блоками.

Форма кромок	Толщина стенки, мм	Номер прохода	Сварочный ток, А	
			импульса	паузы
			Автоматическая	
Без скоса	1,0 2,0 4,0	1	80—85 105—110 110	8 8 20
			Ручная	
Без скоса	1,0—1,5 2,0—2,5	1	40—50 50—70	6—8
V-образные, угол раскрытия 60—70°, притупление 1 мм	2,5—4,0	1 2	105—125	6—8 —

Сварка пульсирующим током. При сварке пульсирующим током металл плавится во время импульса тока и кристаллизуется в течение паузы. Перемещение дуги осуществляется с постоянной скоростью или отдельными шагами, синхронизированными с импульсами сварочного тока. В результате шов представляет собой серию частично перекрываемых точек. К параметрам режима относятся амплитуды тока импульса и тока паузы, длительности импульса и паузы, шаг перемещения.

Сварка пульсирующим током обеспечивает лучшую стабильность проплавления в различных пространственных положениях, меньшую чувствительность к неточностям сборки. Снижение теплового потока в моменты тока паузы позволяет уменьшить перегрев сварного соединения, а следовательно, и деформацию.

Если автоматическая сварка ведется с присадочной проволокой, то ее подача осуществляется в момент тока импульса; при токе паузы скорость подачи уменьшается или снижается до нуля. Когда автоматическая сварка выполняется с поперечными колебаниями сварочной горелки, например при соединении неповоротных стыков труб с разделкой кромок, импульсы сварочного тока подаются в моменты нахождения дуги у кромок. Во время

Таблица 6.16

Длительность, с		Скорость сварки, м/ч	Расход аргона, л/мин	
импульса	паузы		в горелку	на поддув
сварка				
0,1—0,15 0,2—0,25 1,0	0,15—0,25 0,25—0,3 0,7—0,8	6—18 10—12 4	6—12	2—6
сварка				
0,1—0,15 0,4—0,6	0,15—0,25 0,3—0,5	—	6—12	2—6
1,5—2,0 —	0,3—0,5 —			

прохождения дуги через центральную часть разделки сварочный ток уменьшается с одновременным уменьшением скорости подачи присадочной проволоки. Это позволяет улучшить сплавление кромок и получить более равномерное формирование шва во всех пространственных положениях.

При ручной сварке пульсирующим током сварщик следит за миганиями дуги, задерживая на месте горелку в момент тока импульса, и перемещает ее примерно на 2/3 диаметра сварочной ванны в моменты тока паузы. Присадочная проволока в этом случае подается в зону сварки без окунания конца электрода в ванну, как это принято при аргонодуговой сварке непрерывным током.

В табл. 6.16 приведены ориентировочные режимы автоматической сварки пульсирующим током неповоротных стыков трубопроводов из стали 1Х18Н9Т. Сварка пульсирующим током неповоротных стыков трубопроводов, особенно малого диаметра, обеспечивает равномерность проплавления как корня шва, так и стенок разделки. Например, медно-никелевые трубы диаметром 22 мм при толщине стенки 6,0 мм свариваются автоматической головкой во всех пространственных положениях вольфрамовым электродом диаметром 2,0 мм в аргоне с применением

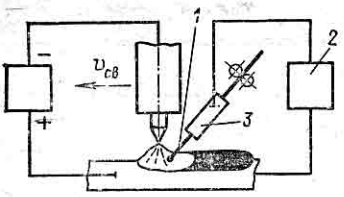


Рис. 6.19. Схема процесса сварки с подогревом проволоки

пульсирующего тока. Стык, имеющий притупление 1,5 мм и V-образную разделку кромок, заполняется присадочной проволокой диаметром 1,2 мм, содержащей 70 % меди и 30 % никеля. Корневой шов выполняется в режиме: ток импульса 90 А, ток паузы 35 А, время импульса 0,7 с, время паузы 1,8 с, скорость сварки 4 м/ч. Подача присадочной проволоки со скоростью 0,15 м/мин исключает пористость в корне шва. Пульсация тока обеспечивает равномерный проплав внутри трубы без утяжки в потолочном положении. При последующей сварке четырех заполняющих проходов импульсный ток повышается до 200 А, а время импульса и паузы снижается до 0,2 и 1 с соответственно. Это позволяет обеспечить надежное проплавление кромок и равномерно заполнить разделку со скоростью подачи присадочной проволоки, увеличенной до 0,23 м/мин.

Сварка вольфрамовым электродом с подогреваемой присадочной проволокой. Схема процесса представлена на рис. 6.19. Подогрев присадочной проволоки *1* осуществляется за счет джоулева тепла при пропускании тока через проволоку от дополнительного трансформатора *2*. Механизм подачи присадочной проволоки и токоподвод *3* должны быть электрически изолированы от изделия. Присадочная проволока, как правило, подается в сварочную ванну сзади дуги и направляется под углом 30—60° от оси горелки. Возможна подача проволоки впереди дуги. При взаимодействии сварочного тока и магнитного поля тока подогрева происходит незначительное колебание столба дуги, не оказывающее заметного влияния на процесс сварки.

Применение подогретой присадочной проволоки позволяет существенно увеличить производительность процесса. При сварочном токе 330 А наибольшая производительность наплавки в случае применения холодной присадочной проволоки составляет 1,3 кг/ч, а при горячей — до 3,5 кг/ч; она может быть еще увеличена, если сварочной головке придать колебательные движения поперек шва. Так, при сварочном токе 500 А и поперечных колебаниях дуги производительность наплавки увеличивается до

Таблица 6.17

Номер прохода	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость подачи подогретой проволоки, м/ч	Скорость сварки, м/ч	Производительность наплавки, кг/ч
1	240	11	152	13,7	1,3
2	340	13	228	18	1,7
3	440		450		3,5
4	450		450—700		3,5—6,0

12 кг/ч. Другим преимуществом процесса является снижение вероятности образования горячих трещин при сварке ряда сталей аустенитного класса. Нагрев присадочной проволоки обеспечивает снижение пористости в наплавленном металле.

Этот процесс находит применение при сварке сосудов и поворотных стыков труб из углеродистых, нержавеющих сталей и медно-никелевых сплавов.

В табл. 6.17 представлены режимы сварки труб диаметром 150 мм из нержавеющей стали толщиной 10 мм. Трубы собраны с V-образной разделкой кромок, притупление в корне шва 1 мм, угол раскрытия 75°, диаметр присадочной проволоки 1,2 мм.

Особенно эффективно применение подогрева присадочной проволоки для заполнения стыков труб, имеющих разделку с параллельными кромками. На рис. 6.20 изображены макрошлифы сварных соединений труб диаметром 140 мм, с толщиной стенки 22 мм из стали 1Х16Н16МВ2БР. На рис. 6.20, *а* показан макрошлиф соединения после сварки притупления стыка толщиной 6 мм и первого заполняющего шва. В дальнейшем разделка, имеющая параллельные кромки, заполнялась четырьмя швами с применением подогреваемой присадочной проволоки марки 04Х19Н11М3 диаметром 1,0 мм (рис. 6.20, *б*). Ширина разделки 10 мм, глубина 14 мм. Режим сварки заполняющих швов: сварочный ток 340 А, ток подогрева присадочной проволоки 100—120 А, скорость сварки 6 м/ч, расход аргона 15 л/мин, диаметр вольфрамового электрода 5 мм, угол заточки 45°, притупление торца 1,55 мм. Проволока подавалась на перед-

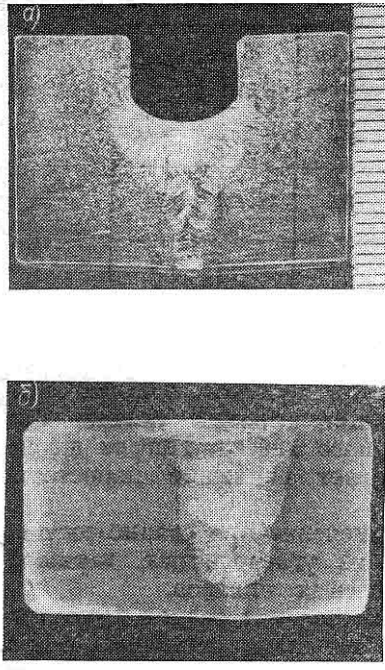


Рис. 6,20. Макрошлифы сварных соединений

нюю кромку сварочной ванны под углом 45°. Скорость подачи присадочной проволоки при выполнении первого или второго заполняющих швов составила 480 м/ч, а при сварке третьего и четвертого швов была снижена до 300 м/ч.

Высота наплавленного валика 5—6 мм. Металлографические исследования показали отсутствие макро- и микротрещин и несплавлений. Время заплавления разделки кромок составило 17 мин, что в два раза меньше, чем при сварке с неподогреваемой присадочной проволокой, и сравнимо со временем сварки плавящимся электродом под флюсом.

Многодуговая сварка вольфрамовыми электродами. Сварка несколькими вольрафмовыми электродами, расположенными вдоль линии шва, является эффективным способом получения швов без подреза при высоких скоростях сварки. Число электродов выбирается в зависимости от толщины металла и необходимой скорости сварки. На практике, как правило, используются двух- или трехэлектродные горелки. Расстояние между электродами устанавливается в пределах 15—30 мм. Чем ближе электроды, а следовательно, и сварочные дуги располагаются друг к другу, тем выше концентрация нагрева и скорость сварки. Минимальное расстояние определяется из условий устойчивого горения сварочных дуг, которые под действием электромагнитных сил взаимно притягиваются и искривляются. Длина каждой дуги устанавливается в пределах 0,5—1 мм. При многодуговой сварке вольфрамовыми электродами прямошовных труб из нержаве-

Таблица 6.18

Диаметр трубы, мм	Толщина стенки, мм	Сварочный ток, А			Скорость сварки, м/ч	Общий расход аргона, л/мин
		1-я дуга	2-я дуга	3-я дуга		
19	1,0	120—150	180	200	330	30
	1,2 1,5			До 250	300 240	
60 76	3,0 4,0	275 250	280 150	310 140	120 50	

ющих сталей скорость сварки увеличивается в 2—3 раза по сравнению с однодуговой сваркой.

В табл. 6.18 приведены ориентировочные режимы сварки тремя дугами прямошовных труб из нержавеющей стали.

Сварка проникающей дугой с применением заостренного вольфрамового электрода. В этом варианте сварки используется сочетание острой заточки конца вольфрамового электрода и высоких значений сварочного тока. В результате возрастают плотность сварочного тока, скорость и давление плазменных потоков, направленных от катода к аноду, и обеспечиваются условия для образования под дугой сквозного кратера на передней кромке сварочной ванны.

На рис. 6.21 приведена фотография процесса сварки проникающей дугой стыкового соединения из нержавеющей стали толщиной 10 мм. Столб дуги *1*, горящей между заостренным вольфрамовым электродом и изделием *2*, проплавляет сквозной кратер с выходящим из него плазменным факелом *3*. Появление плазменного факела длиной, примерно равной толщине проплавленного металла, обусловливает полное проплавление кромок стыка. Расплавленный металл, обтекая столб дуги, формируется в концевой части сварочной ванны и удерживается на весу за счет сил поверхностного натяжения. Поэтому отпадает необходимость в применении технологических подкладок с обратной стороны шва, так как проникающая дуга почти полностью погружена внутрь сварочной ванны, теплота дуги используется более эффективно, значительно увеличивается ее проплавляющее

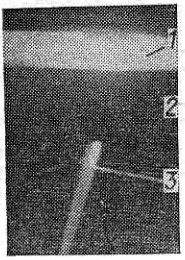


Рис. 6.21. Фотография процесса сварки проникающей дугой

действие. Этот процесс целесообразно применять для однопроходной сварки стыковых соединений без разделки кромок из нержавеющих сталей толщиной 3—8 мм и титановых сплавов толщиной до 10 мм. Режимы сварки стыковых соединений без разделки кромок в нижнем положении приведены в табл. 6.19. В вертикальном и потолочном положениях для улучшения формирования обратного валика сварка ведется пульсирующим током.

Сварка проникающей дугой выполняется с применением стандартного оборудования для автоматической аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом на постоянном токе. Однако следует принять дополнительные меры для повышения эффективности охлаждения вольфрамового электрода и газовой защиты металла шва как со стороны сварочной ванны, так и со стороны обратного валика.

При сварке на токах до 400 А следует применять вольфрамовые электроды диаметром 5—6 мм с углом заточки 30—60°, на токах 400—600 А диаметр электрода должен быть увеличен до 8—10 мм. Диаметр притупления электрода должен лежать в пределах 0,3—1,0 мм.

Сварные соединения имеют хорошее формирование без резких переходов от проплава к основному металлу.

Такие достоинства сварки проникающей дугой, как высокая стабильность сквозного проплавления стыка во всех пространственных положениях, малая чувствительность к неточностям сборки соединяемых элементов, высокая скорость сварки, возможность формирования

Таблица 6.19

Металл	Толщина металла, мм	Сварочный ток, А	Скорость сварки, м/ч	Расход аргона, л/мин
Нержавеющая сталь	4,0	400—420	35—40	В сопло 15,0 В насадку 4—12 В подкладку 4—10
	6,0	550—570	36	
Сплав титана	8,0	370—390	15	
	10,0	440—460		

шва на весу без подкладок с обратной стороны, позволяют успешно применять этот процесс для сварки труб. Так, например, корневой шов на трубах диаметром 1420 мм сваривается двумя автоматами за 7—8 мин, что в четыре раза быстрее, чем при ручной сварке покрытыми электродами. Перед сборкой труб притупление V-образных кромок увеличивали с 2 до 3—4 мм по всему периметру трубы с помощью шлифмашины, одновременно зачищая поверхность кромок от ржавчины и грязи до металлического блеска. Стыки труб, собранные на внутреннем центраторе, обычно имеют местные смещения кромок до 3 мм и переменный зазор 0—1,5 мм. Сварка ведется сверху вниз двумя автоматами комплекса типа АДГ-506. Режим сварки: ток импульса 430—440 А, базовый ток 350—360 А, время импульса 0,2 с, время паузы 0,3 с, скорость сварки 20 м/ч, напряжение дуги 10 В, расход аргона 15 л/мин. Корневой шов высотой 4—6 мм с серебристой наружной поверхностью надежно формируется во всех пространственных положениях. На рис. 6.22 показаны макрошлифы поперечных сечений корневого шва. При сварке в нижнем и вертикальном положениях обратный валик — гладкий, с плавным переходом в местах смещения кромок, имеет ширину 2,5—4 мм и высоту до 2,5 мм. В потолочном положении местные утяжки обратного валика не превышают 0,3 мм. Результаты рентгеноконтроля, анализ макро- и микрошлифов и излом образцов свидетельствуют о монолитности корневых швов, выполненных проникающей дугой. Сварные соединения с корневым швом, выполненным аргонодуговой сваркой, имеют угол загиба 120—150°, предел прочности $\sigma_B = 618 \ldots 633$ МПа, ударную вязкость металла шва 129 Дж/см^2 при температуре +20 °С и 65 Дж/см^2 при температуре —40 °С и отвечают стандартным требованиям.

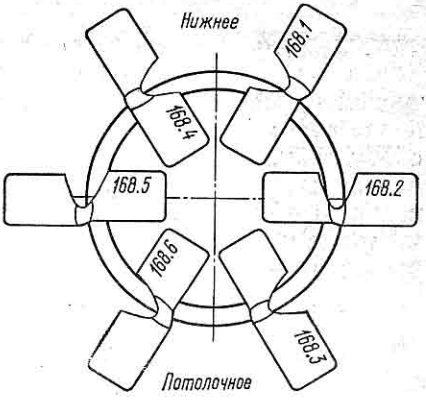


Рис. 6.22. Макрошлифы поперечных сечений корня шва

6.15. ЭКСПЛУАТАЦИЯ, РЕМОНТ И НАЛАДКА ОБОРУДОВАНИЯ

Особенности эксплуатации. Сварка неплавящимся электродом весьма чувствительна к стабильности параметров процесса, с этим связаны и особенности эксплуатации оборудования.

Сварочная горелка при эксплуатации подвергается наибольшей нагрузке и поэтому нуждается в постоянном контроле и профилактике. Перед включением после перерыва в работе необходимо проверять состояние газового тракта горелки. Обычно проверка осуществляется внешним осмотром и контрольным зажиганием дуги. После зажигания дуги и выдержке ее в течение одной-двух минут на рабочем токе дуга отключается. Поверхность электрода должна быть светлой, неокисленной. Наличие на поверхности синего налета означает подсос воздуха в газовый тракт или недостаточность времени поступления газа после погасания дуги. Неокисленной должна остаться также и поверхность кратера на изделии. Наличие на ней синего или желтого налета при чистом вольфрамовом электроде свидетельствует о неравномерности потока газа, например о нарушении газовой линзы или засорении одного из каналов для ввода газа в сопло.

В горелках с водяным охлаждением необходимо регулярно перед включением, после каждого перерыва в работе, проверять целостность водяного тракта и прохождение воды. В горелках, снабженных водотокопроводом, со временем возможно окисление контакта, проявляющееся при сварке в виде нестабильности горения дуги. Проверку надлежит проводить периодически, но не реже одного раза в неделю. После 300—400 ч эксплуатации проверка должна быть учащена вплоть до ежедневной. Проверка может производиться низковольтным пробником или омметром путем измерения сопротивления водотокопровода при изменении положения горелки или при проведении контрольных зажиганий дуги и наплавке при различных поворотах горелки.

В установках, снабженных искровыми осцилляторами (возбудителями дуги), периодическому контролю и очистке должны подвергаться электроды разрядных промежутков. Перед проведением этой операции установка должна отключаться от сети.

При эксплуатации оборудования для сварки неплавящимся электродом должны применяться обычные правила

профилактики, относящиеся как к электрической, так и к механической части оборудования. В частности, периодически необходимо проверять состояние контактов в разъемных соединениях и электромеханических реле. При сварке на переменном токе с емкостным подавлением постоянной составляющей в токе дуги особое внимание следует обратить на реле, шунтирующее конденсаторную батарею на время возбуждения дуги. Окисление контактов этого реле может нарушить процесс поджига, а их замыкание — процесс горения дуги. Аналогичный эффект возникает и при окислении или замыкании контактов реле дуги.

Механизмы автоматов нуждаются в постоянной профилактике, в частности в смене смазки. Следует помнить, что вытекание смазки вследствие нагрева механизма может привести к попаданию ее в зону сварки и образованию дефектов в шве.

В автоматах, снабженных стабилизаторами длины дуги или системами АРНД, необходимо ежедневно проверять состояние этих механизмов, обращая особое внимание на легкость хода и отсутствие люфтов. Также необходимо наблюдать за состоянием механизма поперечного перемещения в системах слежения за стыком и в устройстве колебаний электрода поперек шва.

В устройствах для подачи присадки надо постоянно следить за жесткостью крепления мундштука для ввода присадки в ванну и за отсутствием проскальзывания проволоки в подающих роликах.

Ремонт и наладка оборудования. Неисправности оборудования для сварки неплавящимся электродом делятся на две группы: проявляющиеся в наладочных операциях и диагностируемые только при зажигании и горении дуги.

К первой группе относятся неисправности в механизмах автомата и в цикловых операциях схемы управления, например заедание в механизме перемещения горелки, несвоевременное включение или несрабатывание газового клапана и т. п. Поиск и устранение таких неисправностей не имеют специфических особенностей и обычно отражены в инструкциях по обслуживанию установок и автоматов.

Неисправности второй группы, напротив, как правило, труднодиагностируемы и специфичны.

Неисправности в установках постоянного тока. Наиболее распространенная неисправность при сварке на малых токах — нестабильность провара, вызванная про-

странственной нестабильностью дуги. К ней приводит, как правило, либо плохое качество вольфрамовых электродов, либо неправильный выбор материала или геометрии электрода. Рекомендации по выбору марки электрода приведены в § 6.12. Необходимо подчеркнуть, что слишком острая заточка электрода приводит к быстрому обеднению конца электрода легко ионизируемыми примесями и переходу катодного пятна на боковую поверхность. При этом на поверхности электрода появляются нитевидные «усы», образующие венчик на расстоянии нескольких миллиметров от конца электрода. Причинами нестабильности провара могут быть также окисление вольфрама из-за дефектов в газовой защите или загрязнение электрода материалом изделия. Признаком окисления является синий налет на поверхности электрода, а признаком загрязнения — черный ноздреватый налет и быстрое разрушение (большой расход) вольфрама. Загрязнение электрода возможно как вследствие неправильного выбора тока поджига или неумелых действий сварщика при поджиге коротким замыканием, так и из-за недостаточной газовой защиты ванны или неправильного выбора режима сварки.

Поиск причины неисправности этого типа следует начинать с перезаточки электрода и проверки газовой цепи. При поджиге коротким замыканием следует проверить значение тока короткого замыкания. Оно должно быть не более 20—25 А (при работе на токах 100—200 А). Если в оборудовании предусмотрено нарастание тока до рабочего только после возбуждения дуги, необходимо проверить выполнение этого требования путем замера тока короткого замыкания.

Другой причиной нестабильности провара может быть неправильная работа устройства стабилизации длины дуги либо из-за неисправностей в механической части (заедание, люфт), либо вследствие нарушения в системе АРНД.

К такому же эффекту приводят и нестабильность скорости перемещения горелки (изделия), вибрации горелки и т. п.

При сварке с автоматической подачей присадочной проволоки распространены два дефекта: нестабильность скорости подачи и неправильный ввод присадки в сварочную ванну. Если в первом случае это скажется на величине усиления, то во втором может быть нарушен весь

процесс сварки. В этом случае надлежит проверить правильность положения мундштука и жесткость его закрепления, а также качество намотки проволоки в кассете и ее правки. Нестабильность подачи может быть вызвана проскальзыванием проволоки в подающих роликах, заеданием на любом участке от кассеты до ванны, вызванным засорением или нарушением формы канала для проволоки и неисправностями привода.

При плохом зажигании дуги через зазор следует прежде всего проверить исправность газовой системы и правильность выбора и подготовки вольфрамового электрода. Причиной плохого зажигания может быть также и неисправность горелки — плохая изоляция токоведущего кабеля, плохая изоляция электрода от сопла, высокая проводимость воды в системе водоохлаждения. Для проверки собственно возбудителя удобен следующий прием: отключается сварочная горелка и к ее гнезду подносится провод, соединенный через конденсатор небольшой емкости (0,15—0,1 мкФ, 400—500 В) с зажимом «Изделие». При правильной работе возбудителя искра должна возникать при длине промежутка более 1 мм. При отсутствии искры неисправность следует искать в возбудителе, а при ее наличии — в горелке или кабеле. В самом возбудителе прежде всего надлежит проверить наличие питания и состояние всех коммутаторов (разрядник, тиристор).

Неисправности в установках переменного тока. В установках переменного тока, кроме перечисленных выше неисправностей, имеется и ряд специфических.

Как уже отмечалось, для зажигания дуги переменного тока поджигающий импульс должен быть правильно сфазирован с напряжением на электроде. При неправильной фазировке искра в промежутке не переходит в дугу. Настройка фазы осуществляется с помощью имеющегося в возбудителе подстроечного резистора либо «на ощупь» по наилучшему зажиганию, либо по осциллограмме напряжения на конденсаторе защитного фильтра.

Плохо возбуждается дуга также и при неправильной работе устройства для подавления постоянной составляющей тока дуги. Признаком неисправности в этой цепи являются резкие броски тока (при подавлении постоянной составляющей с помощью конденсаторной батареи).

Дуга может плохо возбуждаться при неправильном выборе диаметра электрода или изменении расхода газа

(на малых токах). Признаком такой неисправности является полное выпрямление тока дуги при возбуждении (или большое время возбуждения полуволны тока прямой полярности).

Наконец, дуга может плохо возбуждаться при плохой работе стабилизатора или устройства переключения с осциллляторного в стабилизаторный режим (реле дуги). В частности, переключение в стабилизаторный режим должно происходить лишь после возникновения полуволн тока прямой полярности.

Нестабильность горения дуги может быть вызвана неправильным выбором режима сварки. В частности, угол сдвига между напряжением холостого хода и током дуги должен быть близок к 90°. Мгновенное значение напряжения холостого хода в момент смены направления тока должно быть не ниже 70 В. Для обеспечения этого условия не рекомендуется регулировать ток балластными реостатами в цепи дуги.

Другое явление — «задыхание» дуги — возникает при автоматической сварке на больших токах с низкой скоростью. Причина его — «чрезмерная» очистка ванны и отсутствие окислов в зоне дуги, что мешает зажиганию тлеющего разряда при повторном возбуждении полуволн тока обратной полярности. Порог возникновения этого явления может быть повышен увеличением диаметра электрода (см. § П4.6 приложения 4).

К неисправностям собственно стабилизатора относятся нарушение фазировки импульса и снижение его амплитуды. Импульс должен появляться с запаздыванием 60—200 мкс после смены полярности дугового напряжения. Методы проверки и настройки этого запаздывания зависят от схемы стабилизатора и обычно указываются в описании установки. Снижение амплитуды импульса встречается реже и связано с неисправностями в цепи заряда накопителя стабилизатора. Напряжение на нем должно быть не ниже 600 В (при гальванической связи с цепью дуги).

Наладка и ремонт возбудителей и стабилизаторов требуют высокой квалификации и могут производиться только специально обученным персоналом с соблюдением всех правил техники безопасности.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГОЙ, УПРАВЛЯЕМОЙ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

7.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ

Воздействие магнитного поля на электрическую дугу известно еще с прошлого столетия. Исследованию влияния на дугу магнитного поля посвящено большое число работ. Эти исследования позволили решить ряд практических задач в различных областях техники.

Впервые дуга, вращающаяся между угольными электродами, была использована в печах для плавки металлов, а дуга с вращающимся пятном на цилиндрическом медном катоде — в мощных выпрямителях с газовым дутьем. Сравнительно недавно электрическая дуга, управляемая магнитным полем, была использована для сварки изделий. Автоматическую приварку труб к плоскости выполняли конической дугой, анодное пятно которой перемещалось по сплавляемому торцу трубы, а катодное сосредоточивалось на неплавящемся электроде.

Неподвижность одного из активных пятен вращающейся дуги существенно ограничивала ее практическое применение для сварки различных видов соединений. Способ сварки электрической дугой с вращающимися в магнитном поле анодным и катодным активными пятнами был предложен Н. Я. Кочановским, Е. С. Федером и С. М. Катлером, разработан и впервые внедрен во Всесоюзном научно-исследовательском институте электросварочного оборудования (ВНИИЭСО).

Основные схемы процесса. Дугу, оба активных пятна которой вращаются, можно возбуждать между свариваемыми частями изделия либо между изделиями и вспомогательным электродом.

Рассмотрим оба случая на примере сварки труб встык. В первом случае (рис. 7.1) две трубы *1* и *1'*, подлежащие сварке, и обмотки электромагнитов *2* и *2'* располагаются соосно. Обмотки создают магнитные потоки, направленные навстречу друг другу. В результате в зазоре между деталями магнитное поле имеет радиальную составля-

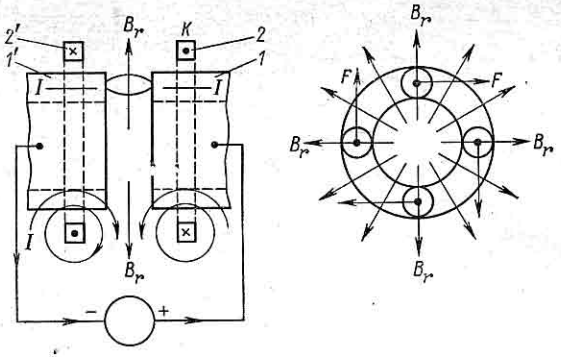


Рис. 7.1. Схема процесса сварки дугой, горящей между свариваемыми частями изделия

ющую. Дугу возбуждают между торцами деталей. Одна из свариваемых деталей является анодом, вторая — катодом. При взаимодействии тока дуги *I* и радиальной составляющей магнитного поля B_r создается усилие *F*, приводящее дугу во вращение. Эта сила, направление которой перпендикулярно направлению тока в дуге и направлению магнитного поля, заставляет дугу перемещаться по поверхности торцов со скоростью, достигающей нескольких десятков метров в секунду. При многократном обходе дуги по торцу трубы разогрев происходит по всему периметру. При наблюдении вращающаяся дуга представляется сплошным кольцом из светящейся плазмы.

При достижении на торцах сварочной температуры производится сдавливание (осадка) аналогично тому, как это делается при контактной сварке. Способ сварки дугой, вращающейся в магнитном поле, с последующей механической осадкой получил название дугоконтактного.

Во втором случае (рис. 7.2) подлежащие сварке трубы *1* и *1'*, медное кольцо *2* и обмотка электромагнита *3* располагаются концентрично. Кольцо охлаждается водой, протекающей по каналу *4*. Электрическая дуга возбуждается между внутренней поверхностью кольца и кромками свариваемых труб. Ток дуги имеет радиальное направление. Магнитное поле в зазоре между трубами и кольцом направлено аксиально. Взаимодействие радиального тока дуги с аксиальной составляющей поля создает усилие, под воздействием которого дуга приходит во вращение и равномерно разогревает кромки труб.

Сварное соединение может быть получено либо за счет оплавления кромок по отбортовке, либо, как и в предыдущем случае, с помощью сдавливания (осадки).

Наибольшее распространение получила дугоконтактная сварка. Для этого способа подробно разработана технология и выпускается оборудование. Второй способ сварки пока нашел применение в установках для сварки труб с трубными досками.

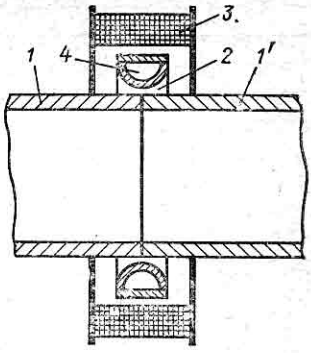


Рис. 7.2. Схема процесса сварки дугой, горящей между изделиями и вспомогательным электродом

Особенности процесса возбуждения и горения вращающейся дуги.

Силы, действующие на дугу. При движении в магнитном поле дуга оказывается под влиянием различных сил, действующих на столб дуги и его активные пятна. Эти силы можно разделить на движущую силу и силы сопротивления. Движущая сила возникает благодаря взаимодействию тока дуги с радиальной составляющей магнитного поля.

Дугу можно рассматривать приближенно как проводник с током. На проводник с током, помещенный в магнитном поле, действует сила F, определяемая законом Ампера:

$$F = \alpha B_r I l,$$

где B_r — радиальная магнитная индукция в зазоре; I — ток дуги; l — длина дуги; α — коэффициент пропорциональности.

При аксиальной дуге и радиальном магнитном поле сила F в каждый момент времени направлена по касательной к окружности трубы и стремится перемещать дугу по торцам труб.

К силам сопротивления относятся сила аэродинамического сопротивления F_1, сила трения увлекаемых дугой газов F_2 о стенки зазора, представляющего собой узкую щель, и сила F_3, противодействующая перемещению активных пятен дуги.

Сила аэродинамического сопротивления зависит от скорости перемещения дуги и напряженности магнитного поля. Сила трения потока газов зависит от скорости перемещения дуги, а также от величины и геометрии зазора. Сила, противодействующая перемещению активных пятен дуги, зависит от материала электродов, их формы, состояния и температуры их поверхностей.

Приближенные аналитические зависимости сил сопротивления от параметров, определяющих перемещение дуги при сварке дугой, управляемой магнитным полем, были получены Ю. Г. Гагеном, В. Д. Тараном [9] и И. А. Шмелевой [46].

Ю. Г. Гаген и В. Д. Таран нашли выражение для сил сопротивления перемещению дуги при ее вращении в поле остаточного магнетизма в условиях, близких к условиям разгона дуги в начальной стадии процесса разогрева (температура торцов около 200 °С, скорость перемещения дуги менее 15 м/с):

$$F_c = 245 B_r l v^{0,8},$$

где B_r — радиальная магнитная индукция, Тл; l — длина дуги, мм; v — скорость перемещения дуги, м/мин.

И. А. Шмелевой получена зависимость сил сопротивления перемещению дуги в стадии установившегося процесса (температура торцов 1100 °С, скорость перемещения дуги 60—80 м/с):

$$F_c = 2{,}26 \rho v^{1,25} I^{0,9} l \sin \alpha,$$

где ρ — плотность воздуха, равная 0,001213 г/см³; l — длина дуги, см; v — скорость перемещения дуги, м/мин.

Однако эти зависимости не охватывают всего процесса разогрева в целом. Приведенные выше формулы выявляют связь основных параметров, определяющих движение дуги на отдельных стадиях процесса.

Рассмотрев характер сил, действующих на дугу в магнитном поле, можно сделать вывод, что сила сопротивления может быть выражена зависимостью

$$F_c = k v^n,$$

где $n = f(v, T)$; k — коэффициент пропорциональности; T — температура торцов; n — показатель степени, различный для каждой стадии процесса.

Особенности перемещения дуги в процессе нагрева. Для дуги, вращающейся между кромками изделия, ха-

рактерно наличие трех стадий горения в процессе всего периода разогрева торцов (рис. 7.3). Одной из существенных особенностей каждой из этих стадий является характер изменения скорости движения дуги и ее электрических параметров. I стадия — зажигание и вращение дуги с нарастающей скоростью. II стадия — установившееся вращение дуги с постоянной максимальной скоростью. III стадия — вращение дуги с переменной скоростью. На первой стадии дуга возбуждается и начинает вращаться с нарастающей скоростью. Приложенная к дуге движущая сила превышает направленные ей навстречу силы сопротивления:

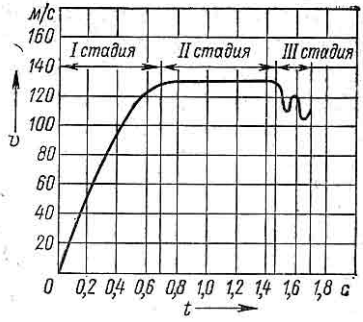


Рис. 7.3. Изменение скорости движения дуги в процессе нагрева

$$F > F_1 + F_2 + F_3.$$

В начале этого периода F_1 и F_2 невелики, поскольку мала скорость движения дуги. Наибольшей из сил сопротивления является сила F_3 в связи с неблагоприятными условиями для перемещения пятен на торцах. В течение периода сила F_3 существенно уменьшается (торцы труб нагреваются, неровности оплавляются, газы дугового промежутка ионизируются). Основными силами сопротивления становятся силы аэродинамического сопротивления и трения. Ускорение дуги в начальный период определяется разностью между движущей силой F и силами сопротивления $F_1 + F_2 + F_3$. Дуга после возбуждения вытесняется к внутренней поверхности торца трубы благодаря тому, что в зазоре существует значительный градиент магнитного поля. По мере нагрева торцов градиент магнитного поля снижается и дуга входит в зазор. В конце периода скорость движения дуги достигает максимального значения. Время установления максимальной скорости, т. е. длительность первого периода, зависит от индукции в зазоре, сварочного тока, толщины стенки, величины зазора и др. Нарастание скорости может произойти практически мгновенно.

Вторая стадия характеризуется движением дуги с постоянной максимальной скоростью. Длительность ее определяется временем, необходимым для появления на торцах пленки жидкого металла. На этой стадии движущая сила уравновешивается силами сопротивления:

$$F = F_1 + F_2 + F_3.$$

На этом этапе снижается индукция в зазоре. Это приводит к уменьшению движущей силы. Однако скорость перемещения дуги остается практически постоянной, так как одновременно уменьшается сила трения F_3. На второй стадии, когда процесс становится установившимся, наблюдаются незначительные пульсации тока и напряжения.

Третья стадия характеризуется движением дуги с переменной скоростью. Эта стадия наблюдается при нагреве торцов выше температуры плавления. Практически вся поверхность торцов свариваемых изделий покрыта пленкой жидкого металла. Движущая сила на этой стадии меньше сил сопротивления:

$$F < F_1 + F_2 + F_3.$$

Сила F продолжает падать, так как в связи с уменьшением зазора снижается индукция в нем. Силы аэродинамического сопротивления и трения потока увлекаемых газов также уменьшаются. Сила сопротивления перемещению активных пятен дуги изменяется нерегулярно, что связано с образованием перемычек жидкого металла, выбрасываемого в виде искр. Нерегулярный характер изменения силы F_3 приводит к колебаниям скорости перемещения дуги.

Деление процесса горения дуги на три стадии чисто условное. Переход от одной стадии к другой происходит плавно, без скачков.

При возбуждении дуги, например, на трубах диаметром 529 мм при сравнительно небольших значениях индукции в зазоре и сварочного тока первый оборот дуга проходит очень медленно — за 4—6 с. Следующие обороты дуга проходит несколько быстрее, но скорость ее не превышает 10—12 м/с, а затем начинает вращаться с нарастающей скоростью. Поэтому некоторые авторы [46] характеризуют процесс горения дуги не тремя, а четырьмя стадиями, дополнительно выделяя стадию зажигания и разгона дуги.

При сварке вращающейся дугой с использованием вспомогательного электрода процесс горения дуги состоит из следующих периодов: I — зажигание и разгон дуги; II — установившееся вращение дуги с максимальной скоростью; III — вращение дуги с замедлением.

Процесс сварки труб из малоуглеродистой стали (см. рис. 7.2) Г. Б. Сердюк [41] объясняет следующим образом.

В начальной стадии труба из малоуглеродистой стали ослабляет управляющее магнитное поле в 1,5—2 раза; кроме того, на этом этапе дуговой промежуток минимален.

По мере прогрева трубы ее магнитное состояние непосредственно возле зоны перемещения дуги изменяется — магнитное поле в дуговом промежутке усиливается и тем самым обеспечивает значительную скорость движения дуги; при этом по мере выплавления металла увеличиваются дуговой промежуток и длина дуги.

На третьей стадии замедление вращения дуги следует объяснить не ослаблением магнитного поля (хотя это и не исключено), а образованием наплывов металла, неравномерность которых создает на пути движения дуги зазоры малой длины. В этих зазорах и происходит задержка дуги.

Исследуя процесс при сварке труб с трубными досками, В. С. Мечев и Д. А. Дудко отмечают, что в течение некоторого времени после возбуждения и разгона дуги, пока металл не плавится, дуга вращается равномерно [28]. По мере нагрева электрода и изделия скорость движения дуги несколько уменьшается. После начала оплавления металла перемещение дуги становится неравномерным.

Скорость движения дуги. Основными параметрами, влияющими на скорость движения дуги, являются радиальная индукция магнитного поля в зазоре и сварочный ток.

На рис. 7.4 и 7.5 приведены кривые изменения максимальной скорости движения дуги в зависимости от радиальной индукции магнитного поля в зазоре и сварочного тока, снятые при сварке труб диаметром 60 мм. Основным параметром, определяющим скорость перемещения дуги, является радиальная индукция в зазоре. При равных значениях радиальной индукции в зазоре увеличение сварочного тока мало влияет на скорость перемещения дуги. Скорость перемещения дуги растет нелинейно с увеличением радиальной индукции в зазоре и сварочного тока. Главной причиной нелинейного харак-

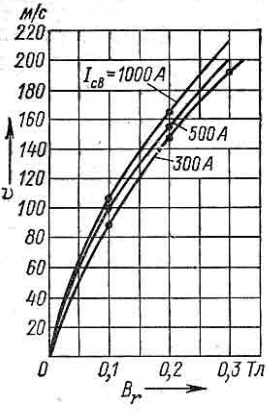


Рис. 7.4. Зависимость скорости движения дуги от радиальной индукции магнитного поля в зазоре

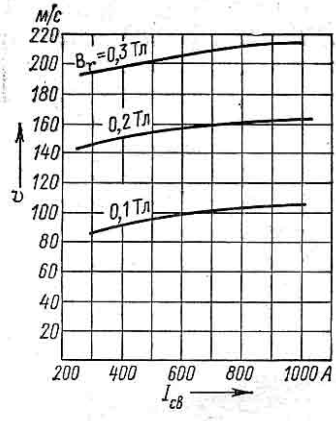


Рис. 7.5. Зависимость скорости движения дуги от сварочного тока

тера этих зависимостей является возрастание аэродинамического сопротивления с ростом скорости перемещения дуги.

При постоянных зазоре между трубами, сварочном токе и радиальной индукции в зазоре скорость дуги тем выше, чем меньше толщина стенки. Такая зависимость объясняется тем, что с уменьшением толщины стенки увеличивается удельная мощность источника нагрева, возрастают температура электродных поверхностей и подвижность дуги [9].

Колебания зазора в диапазоне, допускаемом условиями зажигания и устойчивого горения дуги, мало отражаются на характере изменения ее скорости.

Устойчивость горения дуги. Для получения сварочного соединения необходимы надежное возбуждение и устойчивое горение дуги в течение всего периода нагрева до сварочной температуры. Возбуждение дуги облегчается с увеличением напряжения холостого хода источника питания. Минимально допустимое напряжение составляет 50 В.

Измерения вольт-амперных характеристик перемещающихся в магнитном поле дуг проводили многие исследователи. Установлено, что характеристики дуги являются падающими. В связи с этим источник питания должен обладать падающей внешней характеристикой,

крутизна которой превышает крутизну вольт-амперной характеристики дуги. Источник питания должен обеспечивать высокую скорость нарастания сварочного тока.

Устойчивость горения дуги зависит от радиальной индукции магнитного поля в зазоре и сварочного тока. Каждому значению сварочного тока соответствует определенное минимальное значение радиальной индукции в зазоре, обеспечивающее движение дуги с нарастающей скоростью в начальный период ее вращения. При значении радиальной индукции, меньшем этого значения, в начальный период наблюдается блуждание дуги по торцам, и она гаснет. С увеличением сварочного тока устойчивость дуги повышается. При слишком сильных полях устойчивость дуги нарушается и ее выбрасывает из зазора.

Кроме того, известно, что на дугу оказывает воздействие продольная составляющая индукции магнитного поля, которая деформирует столб дуги. При значительной деформации дуги источник тока не в состоянии обеспечить требуемое для устойчивого ее горения напряжение и дуга гаснет. Это особенно часто наблюдается в начальный период вращения дуги. Поэтому продольная составляющая должна быть по возможности небольшой. Для обеспечения устойчивого перемещения дуги необходимо также, чтобы встречные магнитные поля были симметричными в пространстве зазора.

Стабильность горения дуги существенно зависит от величины зазора и его равномерности по периметру. Недопустимые отклонения зазора от номинального могут привести либо к обрыву дуги, либо к короткому замыканию сварочной цепи, а его неравномерность по периметру — к неодинаковости механических свойств по периметру изделия. Равномерность разогрева кромок возрастает с увеличением скорости движения дуги.

Форма, размеры и материалы свариваемых изделий. Способ сварки дугой, управляемой магнитным полем, может быть применен для сварки любых изделий с замкнутой линией шва: труб, труб с фланцами, труб с ниппелями, изделий сплошных сечений, изделий некруглого сечения — квадратного, прямоугольного, овального, для приварки труб и стержней к плоской поверхности и др. На рис. 7.6 представлены образцы сварных соединений.

Во ВНИИЭСО разработана технология дугоконтактной сварки труб диаметром до 325 мм, с толщиной стенки

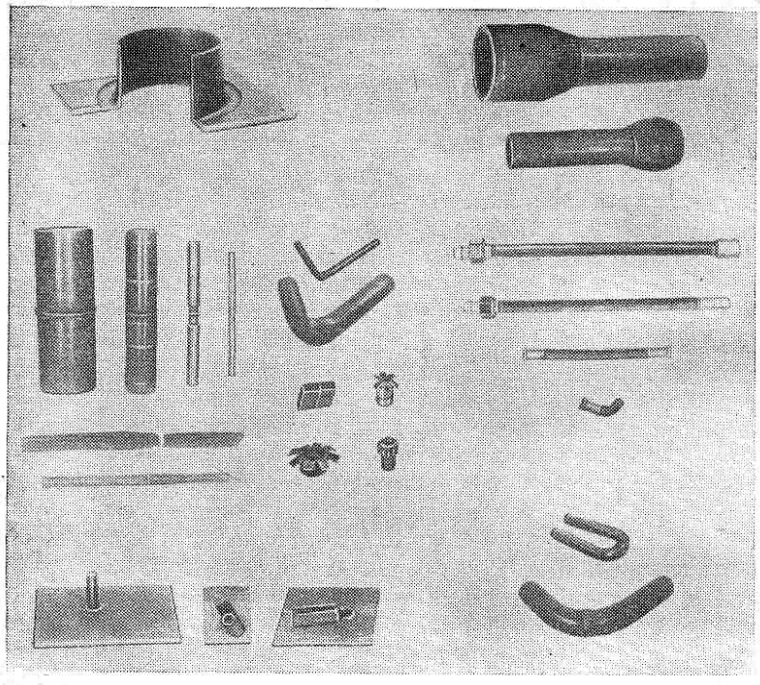


Рис. 7.6. Образцы сварных соединений

9 мм и создано оборудование для сварки труб диаметром до 114 мм, с толщиной стенки до 8 мм. С помощью сварки дугой, управляемой магнитным полем, свариваются следующие материалы: малоуглеродистая, низколегированная, жаропрочная, аустенитная стали, медь, латунь, алюминий, бронза и др.

Основные области применения этого способа сварки — сварка труб в монтажных условиях непосредственно на объектах строительства, сварка на производственных базах труб в плети, заготовка сварных блоков с последующим соединением их на объектах, сварка в заводских условиях массовых серийных изделий.

Технические преимущества способа и недостатки.

Преимущества:

в отличие от дуговой сварки не требуется перемещения сварочной горелки вдоль шва; перемещение дуги осуществляется магнитным полем;

рабочий орган (сварочная головка) может быть отнесен на значительное расстояние от источника питания благодаря дуговому характеру разогрева, требующего в отличие от контактной сварки сравнительно небольших токов. Это позволяет решить задачу автоматизации процесса сварки в труднодоступных местах и в монтажных условиях;

производительность выше, чем при любом из возможных способов сварки;

потребление электроэнергии составляет 10—20 % по сравнению с другими способами сварки;

достигается экономия материалов по сравнению с контактной сваркой и сваркой трением за счет малого изменения длины заготовок при сварке. При дугоконтактной сварке уменьшение длины составляет 0,5—2,0 мм при толщине стенки 1—6 мм;

достигается экономия дефицитных сварочных материалов; сварка осуществляется только за счет разогрева самих торцов, их сдавливания после разогрева;

возможно получение сварных соединений трубчатых изделий с почти неискаженным проходным сечением; грат как наружный, так и внутренний относительно невелик, равномерно распределен по периметру изделий и имеет плавные очертания;

сварные соединения характеризуются высоким качеством и стабильностью механических свойств. У деталей, сваренных при постоянном режиме, разброс показателей предела прочности, угла загиба, ударной вязкости не превышает 5—7 %.

Недостатки:

требуется более высокая точность подготовки торцов свариваемых деталей, чем при контактной сварке;

недостаточно разработаны неразрушающие методы контроля качества сварных соединений.

Особенности формирования соединений. Основной особенностью нагрева при сварке дугой, управляемой магнитным полем, является то, что скорость движения дуги значительно превышает скорость плавления металла, т. е. скорость сварки.

Сварное соединение образуется многократным воздействием дуги на кромки изделия. В связи с большой скоростью перемещения дуги за один ее оборот оплавляется очень малый участок изделия. В дальнейшем размеры оплавленного участка увеличиваются до образова-

ния жидкой пленки по всему периметру. Практически это происходит только после достижения температуры плавления. Кристаллизация металла шва происходит одновременно по всему периметру.

При дугоконтактной сварке в процессе нагрева необходимо обеспечить на торцах свариваемых деталей появление жидкой пленки расплавленного металла, достаточной для надежной защиты металла свариваемых изделий от окисления. Кроме того, жидкая пленка не должна закристаллизовываться до закрытия стыка при осадке. Толщина жидкой пленки должна составлять 0,2—0,3 мм. Дальнейший нагрев, как правило, приводит к нарушению геометрии кромок. Значение давления при осадке должно обеспечивать удаление расплава и окислов из стыка.

Установлено, что при сварке дугой, вращающейся в магнитном поле, катод и анод нагреваются практически одинаково [9, 46]. Благодаря этому магнитное поле в зазоре сохраняется симметричным и обеспечивается стабильность горения дуги в процессе нагрева. Равномерность разогрева анода и катода создает также благоприятные условия для получения качественных соединений.

При сварке вращающейся дугой с использованием неплавящегося электрода без приложения давления сварное соединение получается путем свободного формирования шва за счет образования для двух свариваемых изделий ванночки расплавленного металла.

7.2. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ

Детали, предназначенные под сварку, должны иметь торцы, перпендикулярные оси деталей. Для дугоконтактной сварки пригодны заготовки с торцами, полученными после резки на токарных станках, труборезных станках, маятниковой пиле с последующим снятием заусенцев. Снятия фасок не требуется.

В случае поставки труб с фасками они могут быть сварены при уменьшенном времени сварки.

Основные параметры, рекомендуемые режимы. Основными параметрами при дугоконтактной сварке являются сварочный ток, время разогрева, скорость перемещения дуги, скорость и усилие осадки, величина рабочего зазора между свариваемыми частями.

Удовлетворительное формирование шва может быть получено при различных значениях сварочного тока и

длительности разогрева. Каждому сечению соответствует свой диапазон сварочных токов, в пределах которого обеспечивается удовлетворительное формирование шва.

На рис. 7.7 приведена зависимость длительности разогрева от сварочного тока для различных сечений полых изделий из малоуглеродистой стали с толщиной стенки до 6 мм. Если мощность источника не ограничена, следует стремиться к верхнему пределу сварочного тока с целью увеличения производительности процесса. При заданном заранее источнике питания следует наиболее эффективно использовать его мощность. Источник целесообразно применять с падающей характеристикой и стабилизацией сварочного тока. Очень важным параметром при выборе режима сварки является значение радиальной индукции в зазоре, определяющей оптимальные условия возбуждения и разгона дуги, скорость перемещения дуги во всех стадиях процесса разогрева. От скорости движения дуги существенно зависят равномерность и характер оплавления поверхностей торцов свариваемых изделий перед осадкой. Опыт показал, что при определенных условиях в конечной стадии разогрева может возникнуть локальное увеличение зазора, так называемый вырыв. При осадке в металле, где произошел вырыв, образуется несплошность соединений. Причиной образования вырывов является возникновение жидких металлических капель, скорость перемещения которых значительно меньше скорости движения дуги. Жидкая металлическая капля может образовать перемычку в зазоре между оплавленными торцами, при этом возникает задержка в движении дуги, приводящая к местному расплавлению торцов.

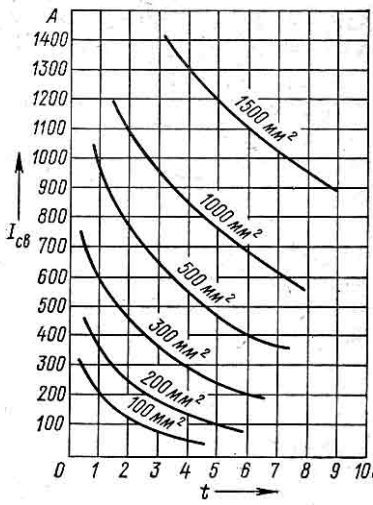


Рис. 7.7. Зависимость длительности нагрева от сварочного тока

Для устранения вырыва необходимо увеличить радиальную индукцию в зазоре. С увеличением скорости

движения дуги становятся более мелкими брызги (капли), выбрасываемые из стыка. Это объясняется увеличением центробежной силы, которая становится способной преодолевать поверхностное натяжение более мелких капель. Практическая скорость перемещения дуги не менее 110—150 м/с позволяет обеспечить равномерное оплавление кромок по периметру и соответственно хорошие механические свойства сварного соединения. Исходя из этого определяется радиальная индукция в зазоре.

Режимы сварки с малой длительностью разогрева при большом токе (жесткие режимы) пригодны для изделий из малоуглеродистых и низколегированных сталей с толщиной стенки до 5 мм. При сварке толстостенных изделий и изделий из сталей, чувствительных к закалке, целесообразно применять программирование режима по току. Весь процесс разогрева в этом случае состоит из двух стадий: а) подогрева малым током; б) импульсного увеличения тока с длительностью импульса менее 1 с. Осадка производится при втором импульсе тока. Сварку в режимах с большой длительностью подогрева малым током надо вести в среде защитного газа.

Удельные усилия несколько выше, чем при контактной сварке; удельное усилие составляет 70—80 МПа для малоуглеродистых сталей, 200 МПа — для аустенитных сталей, 120—150 МПа — при сварке труб с пластиной. Скорость осадки должна быть равной 80—100 мм/с для низколегированных и аустенитных сталей. При сварке аустенитных сталей и цветных металлов в качестве защитного газа применяется аргон.

Оптимальный рабочий зазор между свариваемыми частями изделия мало меняется в зависимости от размеров свариваемых изделий. Так, для труб диаметром до 60 мм оптимальный зазор составляет 2 мм, а для труб диаметром 60—120 мм равен 2,5—3 мм. Разница в величине зазора в двух диаметрально противоположных точках не должна превышать 1 мм.

При сварке вращающейся дугой с использованием неплавящегося электрода большое значение имеет выбранная полярность тока. При сварке медными электродами удовлетворительное качество шва может быть получено при токе обратной полярности. При обратной полярности тока возможна стабилизация траектории движения дуги между электродом и изделием, горение дуги более стабильно, качество защиты шва лучше, износ электрода меньше.

Сварка труб с трубными досками производится несколькими импульсами. Для вращающейся дуги с использованием неплавящегося электрода характерно образование наплывов на шве. Наплывы ликвидируются с введением реверсирования магнитного поля. Число импульсов и частота реверсирования определяются опытным путем и зависят от материала и размеров изделия [7, 21]. Сварка ведется в среде защитного газа. Подача газа необходима как с внутренней, так и с внешней стороны кольцевого электрода. Для обеспечения сварки труб без уменьшения проходного сечения в месте сварки необходима технологическая отбортовка. Профиль и размер отбортовки определяются опытным путем [7, 21].

Особенности строения сварных соединений. Соединения, выполненные дугоконтактной сваркой, имеют такую же структуру, что и соединения, полученные другими методами сварки с приложением давления, например контактной стыковой сваркой оплавлением. Однако имеется и ряд особенностей строения соединений, рассмотренных на примере сварки труб из малоуглеродистой стали.

В большинстве соединений по линии стыка наблюдается светлая обезуглероженная полоска. Структура светлой полоски ферритно-перлитная. Максимальное содержание углерода в светлой полоске 0,08—0,16 % при содержании его в металле свариваемых труб 0,18 %. По обе стороны от светлой полоски располагаются зона крупного зерна и зона мелкого зерна с нормализованной структурой. Ширина и форма светлой полоски зависят от режима нагрева и осадки. При увеличении длительности нагрева и тока дуги увеличивается ширина полоски, с увеличением давления осадки ширина полоски уменьшается, а ее границы становятся более резкими. Изучение свойств сварных соединений показало, что стыки, выполненные дугоконтактной сваркой, отличаются высоким качеством. Прочность сварного соединения превышает прочность основного металла без заметного снижения пластичности. Эти свойства соединений обусловлены отсутствием пор, раковин, инородных включений и других дефектов. Разброс показателей предела прочности, угла загиба, ударной вязкости не превышает 5—10 %. Грат, наружный и внутренний, образующийся при сварке, составляет примерно половину толщины стенки свариваемого изделия.

Контроль качества сварных соединений. Для труб, сваренных дугоконтактной сваркой, приемлемы методы контроля, применяемые при контактной сварке. При разрушающем методе контроля сварные соединения испытывают на растяжение, изгиб, скручивание, ударную вязкость. Ведутся работы по созданию неразрушающих методов контроля. Наиболее перспективным является ультразвуковой метод.

Важной задачей является создание метода автоматического контроля параметров режима сварки в процессе разогрева и осадки: сварочного тока, времени разогрева, напряжения на дуге, скорости движения дуги, усилия и скорости осадки. Частота и сила звука, создаваемого при вращении дуги, зависят от электрических параметров дуги. Это дает возможность использовать для контроля звуковую измерительную технику.

7.3. ОБОРУДОВАНИЕ

Система возбуждения магнитного поля. При сварке дугой, управляемой магнитным полем, для создания магнитного поля в зазоре между свариваемыми изделиями применяются системы возбуждения, состоящие из обмоток возбуждения или из постоянных магнитов. При дугоконтактной сварке, как правило, используются симметрично расположенные с каждой стороны стыка одинаковые обмотки возбуждения или магниты, включенные так, чтобы магнитные потоки были направлены навстречу друг другу (см. рис. 7.1).

Системы возбуждения магнитного поля выполняются неразъемными и разъемными. Неразъемные системы применяются тогда, когда возможно протягивание сваренного изделия через всю машину, а разъемные — тогда, когда протягивание сварного изделия через машину нецелесообразно или невозможно.

Неразъемная система электромагнитов состоит из двух многовитковых обмоток. Обмотки могут быть выполнены из медной шины с изоляцией между витками. При разъемной системе возбуждения обмотка состоит из нескольких отделяемых при разъеме катушек, каждая из которых имеет участки, образующие при установке их в рабочее положение два активных контура, создающих радиальное магнитное поле в зазоре. Обмотки возбуждения могут питаться от отдельного источника питания либо вклю-

чаться последовательно в сварочную цепь. Значительно более просты системы возбуждения на постоянных магнитах.

В неразъемных системах наиболее часто применяются кольцевые магниты, а в разъемных — набор магнитов, например полуколец или сегментов, образующих в рабочем положении кольцевой магнит.

Системы возбуждения на постоянных магнитах более надежны в работе. Разъемные системы создают в рабочем зазоре более однородное по периметру магнитное поле, практически эквивалентное полю при неразъемной системе возбуждения. Постоянные магниты применяются, как правило, при сварке круглых сечений.

Для защиты от брызг металла при сварке, а также от механических воздействий электромагниты и магниты размещаются в хромированных корпусах.

При сварке немагнитных материалов для создания магнитного поля систему возбуждения необходимо дополнить специальными магнитопроводами, фокусирующими поле в зазоре.

В сварочных головках для сварки неплавящимся электродом катушка возбуждения может быть вынесена в сторону от места сварки. В этом случае полюсные наконечники магнитопровода выполняются со скосом торцевых поверхностей. Они устанавливаются таким образом, чтобы воздушный зазор по мере удаления от катушки возбуждения уменьшался. Изменение воздушного зазора позволяет поддерживать постоянным магнитное поле в зоне горения дуги.

Промышленные установки. В состав установок для дугоконтактной сварки входят: подвижные и неподвижные зажимные устройства; система возбуждения магнитного поля; устройство поджигания дуги; механизм осадки; аппаратура управления процессом сварки; источник питания сварочной дуги. Стационарное оборудование, как правило, содержит дополнительно устройства для механизированной загрузки заготовок и выгрузки сваренных изделий.

Зажимные устройства предназначены для зажатия свариваемых деталей и подвода сварочного тока. Конструкция зажимных устройств должна исключать возможность проскальзывания при осадке, деформацию в месте зажатия и обеспечивать электрический контакт. Для предотвращения проскальзывания и уменьшения необ-

ходимого усилия зажатия зажимные губки выполняются стальными с насечкой на внутренней поверхности. Применение стальных губок с насечкой позволило уменьшить соотношение между усилиями зажатия и осадки до 1 : 1 по сравнению с контактной сваркой. Токоподвод осуществляется через зажимные губки.

В стационарных установках зажимные механизмы — самоцентрирующиеся, обеспечивают соосность свариваемых заготовок с точностью 0,1 мм. В зажимных устройствах предусмотрены синхронизирующие элементы, осуществляющие синхронное сближение зажимов относительно оси.

Механизмы зажатия вместе со свариваемыми заготовками в течение всего процесса разогрева остаются неподвижными, что существенно упрощает конструкцию установок. Один из механизмов зажатия выполняется изолированным.

Конструкция устройства поджигания дуги зависит от способа ее возбуждения. В переносных и подвесных сварочных головках требуемый при сварке зазор между заготовками устанавливается предварительно с помощью поворотного упора, управляемого вручную. Короткое замыкание дугового промежутка для возбуждения дуги осуществляется изолированным графитовым электродом.

В стационарных установках для возбуждения дуги используется предварительное кратковременное замыкание дугового промежутка самими изделиями. В зависимости от принятого технологического процесса предварительно заготовки могут быть установлены с зазором и без зазора.

Дуга может быть возбуждена также с помощью осциллятора. Однако этот способ не нашел применения, так как к изоляции установок в этом случае предъявляются повышенные требования.

Механизм осадки — пневматический, пневмогидравлический или гидравлический, развивающий скорость осадки до 200 мм/с.

Аппаратура управления процессом сварки обеспечивает: управление зажатием заготовок, регулируемую выдержку разогрева, включение осадочного давления, отключение сварочного тока и снятие давления осадки, разведение кареток после освобождения сваренного изделия и возвращение схемы в исходное положение.

Заданный цикл сварки отрабатывается с помощью командных устройств, собираемых на элементах контактно-релейной автоматики. Настройка на режим производится предварительно путем регулирования выдержек времени, давления, усилий осадки и зажатия. Элементы контактно-релейной автоматики размещаются в отдельных шкафах управления. На переднюю панель установок вынесены пусковые кнопки, сигнальные лампы.

Регламентация процесса осуществляется по времени. Для управления работой пневматического, пневмогидравлического и гидравлического приводов применяется пневмо- и гидроаппаратура общего применения. Для очистки воздуха устанавливаются фильтры-влагоотделители. Для смазки трущихся частей пневмопривода и пневмоаппаратуры используются маслораспылители.

Давление сжатого воздуха, подаваемого в пневмоприводы установок, регулируется с помощью редукционных пневмоклапанов. Для управления подачей сжатого воздуха в камеры пневмоцилиндров применяются электропневматические клапаны. Для снижения аэродинамического шума пневматических приводов до допустимого санитарными нормами используются глушители.

Питание гидропривода производится, как правило, от насосных станций. Для этой цели используются унифицированные станции. Давление в гидросистемах регулируется с помощью редукционных клапанов с регуляторами, а для управления приводом применяются аппараты с ручным или дистанционным управлением. Используется также и гидравлическая аппаратура: фильтры, предохранительные клапаны, дроссели с регуляторами и другая аппаратура.

В качестве источников питания применяются стандартные сварочные выпрямители.

Технические характеристики установок, разработанных во ВНИИЭСО, приведены в табл. 7.1.

Установка УДК-2701 предназначена для сварки трубопроводов в монтажных условиях. Установка включает в себя две переносные сварочные головки, ресивер и агрегат питания и управления.

По типу сварочных головок установки выпускаются в трех исполнениях:

а) установка с двумя сварочными головками для сварки труб диаметром 21,3 и 26,8 мм — исполнение УДК-2701;

Таблица 7.1

Параметры	УДК-2701	УДК-301	УДК-2201	УДК-6501	УДК-11401
Номинальное напряжение питающей сети, В	380				
Номинальный сварочный ток, А	315	500	315	630	1200
Напряжение дуги, В	26—28			28—30	
Наибольшее свариваемое сечение, мм^2	270	600	220	2×1200	2700
Наибольший диаметр свариваемого изделия, мм	26,8	42	22	62	114
Наибольшая толщина стенки, мм	3,5	5	4	7	8
Номинальное усилие осадки, кН	18	45	20	100	
Машинное время сварки, с	3	4	2,5	7	10
Масса, кг	900	1000	1500	2500	

б) установка с одной сварочной головкой для сварки труб диаметром 21,3 и 26,8 мм и второй сварочной головкой для сварки труб диаметром 10; 12 и 14 мм — исполнение УДК-2701.1;

в) установка с двумя сварочными головками для сварки труб диаметром 10, 12 и 14 мм.

Сварочная головка (рис. 7.8) состоит из подвижного и неподвижного механизмов зажатия труб, привода осадки и системы возбуждения магнитного поля.

Подвижный механизм зажатия представляет собой два шарнирно соединенных рычага *3* и *4*. В рычагах закреплены губки *5* с насечкой для зажатия труб. Зажатие трубы осуществляется с помощью быстродействующего трехшарнирного механизма, состоящего из серьги *2*, талрепа *1* и зажимного рычага *9*. Зажатие труб производится поворотом зажимного рычага.

Конструкция неподвижного механизма зажатия аналогична конструкции подвижного механизма. Подвижный механизм зажатия при осадке перемещается относительно неподвижного по оси *13* и направляющей *6*. Привод осадки *7* — пневматический с диафрагмой. Давление диафрагмы передается через рычаг *12* на зажимные губки с трубами. Рычаг выполнен в виде вилки для симметрич-

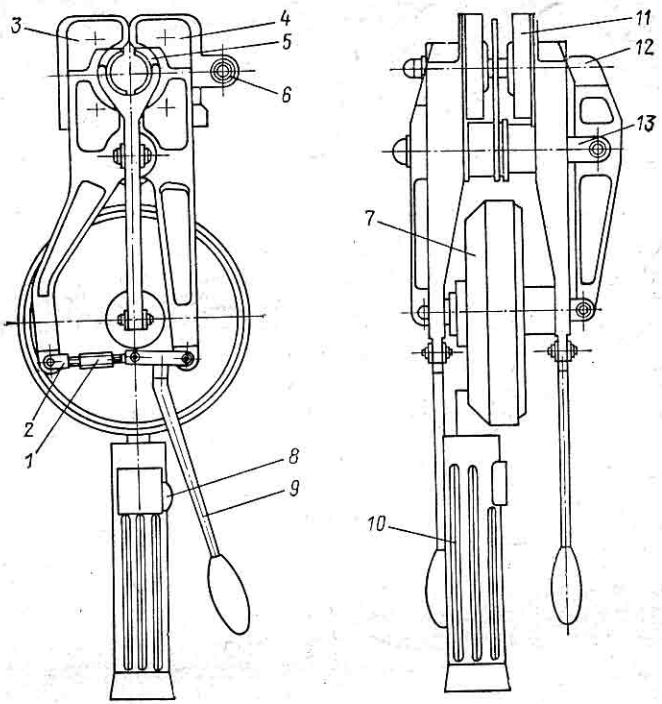


Рис. 7.8. Сварочная головка установки УДК-2701

ного приложения усилия. К приводу осадки крепится ручка *10* с выключателем *8*, при включении которого на дуговой промежуток подается напряжение холостого хода сварочного выпрямителя. Система возбуждения магнитного поля *11* выполнена разъемной, что позволяет беспрепятственно снимать головку со сваренной трубы.

Конструкции сварочных головок для сварки труб диаметром 26,8 и 21,3 мм (большая головка) и для сварки труб диаметром 10, 12 и 14 мм (малая головка) аналогичны. Большая головка создает усилие осадки 18 кН, масса головки 8,5 кг. Малая головка обеспечивает усилие осадки 9 кН, масса головки 6,5 кг.

Агрегат питания и управления включает в себя стандартный компрессор, стандартный сварочный выпрямитель, небольшой блок аппаратуры и барабан для кабеля и шланга.

Сварочная головка обеспечивает сварку труб на расстоянии до 75 м от места расположения агрегата питания. Сварка может быть осуществлена в любом пространственном положении вблизи стен и в углах помещений. Установки просты в обслуживании. При переходе с одного размера свариваемых деталей на другой производится замена зажимных губок и изменяется время сварки, все прочие параметры, в том числе сварочный ток, не меняются.

В качестве оператора, обслуживающего установку, может быть использован малоквалифицированный рабочий после краткосрочного обучения.

Одна из областей применения установки УДК-2701 — сварка санитарно-технических систем зданий всех назначений. Монтаж и сборка санитарно-технических систем под сварку производятся, как правило, заранее. Трубные заготовки стояков изготовляются на заводе.

Обычно агрегат питания располагается около входа на лестничную клетку и подключается к сети переменного тока. В зависимости от этажа, на котором производится сварка, оператор сматывает с барабана кабель необходимой длины, затем с помощью штепсельного соединения подключает кабель к ресиверу. Для выполнения сварки оператор закрепляет подготовленные к сварке трубы в сварочной головке, включает выключатель и возбуждает дугу. После возбуждения дуги процесс сварки происходит автоматически.

Средняя производительность установки УДК-2701 с учетом времени на закрепление и снятие сварочной головки, переходы из квартиры в квартиру, с этажа на этаж и с одной лестницы на другую составляет примерно 30 сварок/ч.

Установка УДК-301 — передвижного типа, предназначена для сварки змеевиков диаметром 25—42 мм. Установка состоит из сварочной головки, пневмогидравлического устройства, шкафа управления и источника питания. Сварочная головка изображена на рис. 7.9. Подвижная *5* и неподвижная *2* каретки размещены на направляющих *3*, которые служат одновременно штоками привода осадки. Направляющие закреплены в подшипниках цельносварной рамы *4*, которая является несущей конструкцией. Механизм зажатия состоит из подвижного и неподвижного рычагов *7*, *8* с закрепленными в них губками *6* и гидроцилиндра *9*. Гидроцилиндр соединен с рычагами с помощью шарниров *10*.

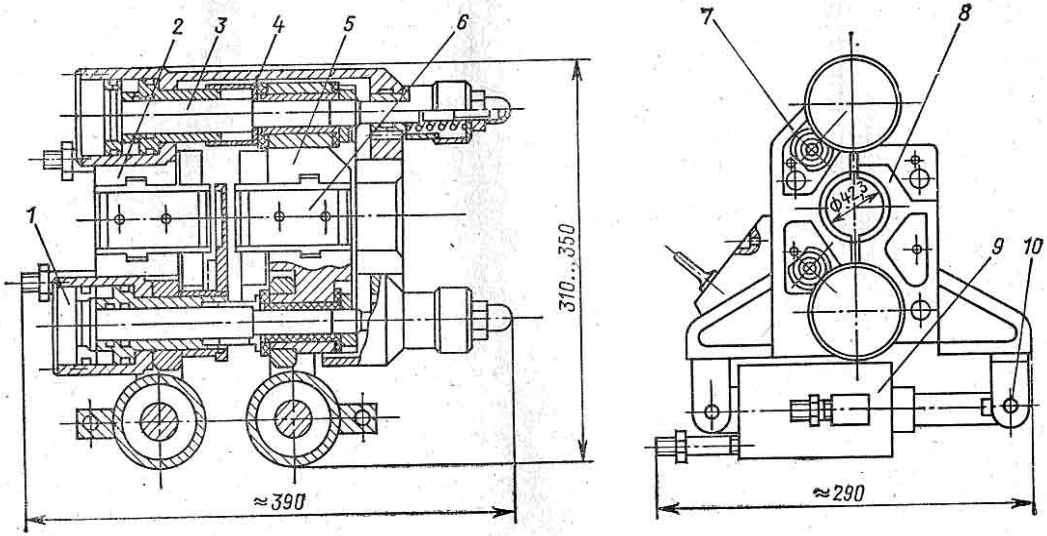


Рис. 7.9. Сварочная головка установки УДК-301

Осадка осуществляется с помощью двух гидроцилиндров *1*. Магнитное поле создается разъемными катушками возбуждения, которые крепятся к рычагам зажатия. Сведение и разведение катушек производится одновременно с зажатием труб. В сварочной головке предусмотрены три комплекта сменных губок для сварки труб диаметром 25; 32 и 42 мм.

Пневмогидравлическое устройство для зажатия труб и осадки выполнено в виде отдельного блока. Вместе со шкафом управления оно смонтировано на подвижной тележке, перемещающейся по двум направляющим, размещенным на высоте 2,5 м.

Сварочная головка подвешена на стальном тросе с противовесом. Стальной трос перемещается по направляющим роликам, закрепленным на концах подвески. Сварочная головка связана с пневмогидравлическим устройством, шкафом управления и источником питания гибкими кабелями и рукавами высокого давления. Масса сварочной головки около 35 кг.

Установка типа УДК-2201 (рис. 7.10) предназначена для сварки труб высокого давления в узлах тракторных прицепов. Трубы высокого давления представляют собой сварные соединения ниппеля, штуцера и трубы. Применяются ниппели и штуцеры нескольких типов, в том числе ниппели с гайкой.

Конструкция установки предусматривает проведение сварки по следующей технологической схеме. Механическая рука *3* устанавливает ниппель в зажим для ниппеля. После зажатия ниппеля к нему вручную подводится до соприкосновения труба и зажимается. Зажатые заготовки разводятся на величину рабочего зазора, в котором возбуждается сварочная дуга. По истечении времени разогрева производится осадка. Сваренные трубы высокого давления собираются в накопителе. Зажим ниппеля *2* располагается на подвижной каретке, а зажим трубы *4* — на неподвижной. Зажимы — самоцентрирующиеся. Привод зажатия — пневмогидравлический. Усилие создается мультипликаторами *5*. Подвижный зажим перемещается с помощью многопоршневого пневмоцилиндра *1*, представляющего собой в едином корпусе три самостоятельных цилиндра. Один из цилиндров многопоршневого пневмоцилиндра обеспечивает перемещение подвижного зажима на величину рабочего зазора между свариваемыми заготовками. Направление перемещения, задаваемое

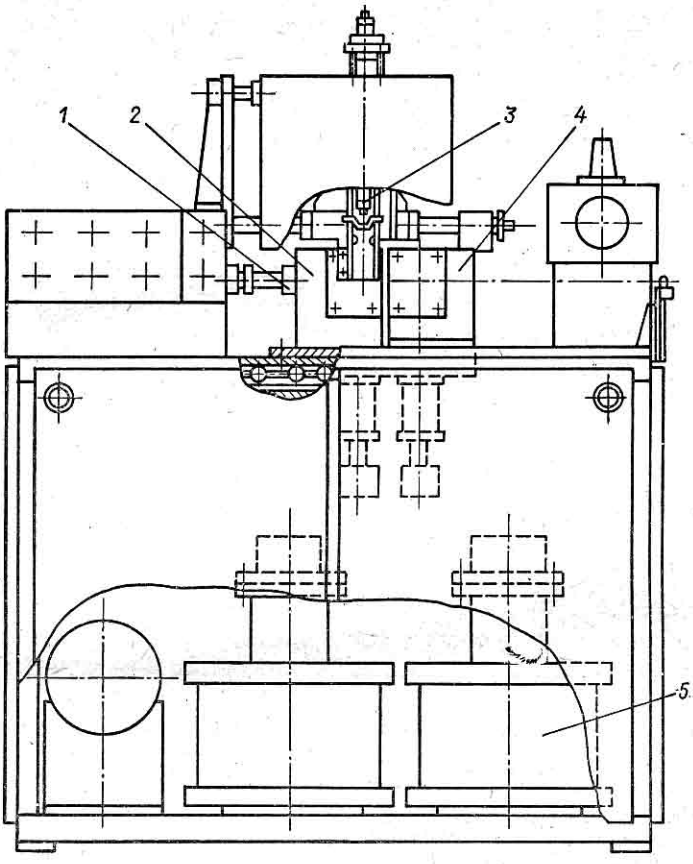


Рис. 7.10. Установка типа УДК-2201

цилиндром, противоположно направлению движения при осадке. Два других цилиндра обеспечивают перемещение каретки во время осадки и создают осадочное усилие. Эти цилиндры работают параллельно. Заготовки ниппелей перед сваркой загружаются на лоток, расположенный над подвижным зажимом. Механическая рука в исходном положении установлена над ниппелем, лежащим на лотке. По команде оператора механическая рука производит захват ниппеля с лотка, поворот и опускание ниппеля в зажим. Перемещения руки осуществляются пневмоцилиндрами. Управление последовательностью операций

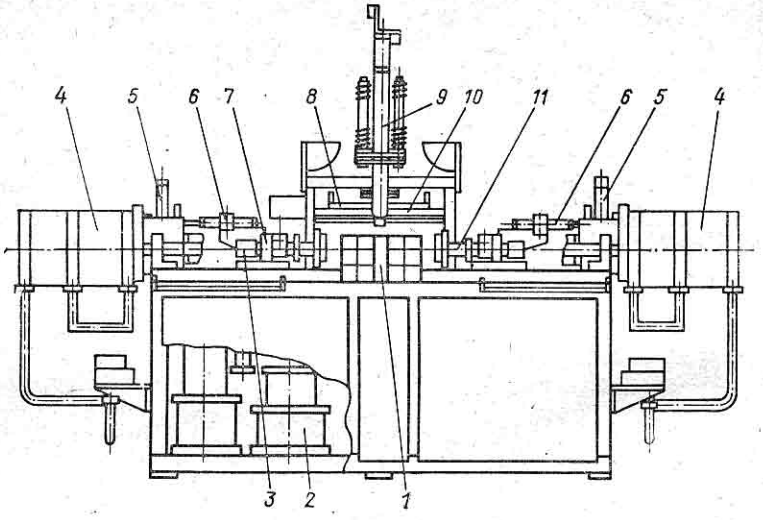


Рис. 7.11. Установка УДК 6501

захвата, подъема, опускания, возвращения руки в исходное положение производится с помощью релейной автоматики, конечных выключателей и электропневматических клапанов.

В установке предусмотрено также приспособление для ручной загрузки ниппеля. Приспособление представляет собой поворотное устройство с набором цанг для каждого типа ниппеля. В момент загрузки ниппеля устройство устанавливается вертикально. Ниппель насаживается на цангу и с поворотом на 90° опускается в зажим. После сварки поворотное устройство возвращается в исходное положение.

Установка типа УДК-6501 (рис. 7.11) предназначена для сварки плунжеров гидроподъемников тракторных прицепов. Плунжер гидроподъемника состоит из трех частей: головки, трубы и нижней части. Эти составные части свариваются одновременно.

Машина содержит три механизма зажатия, в которых зажимаются составные части плунжера. Более легкие и малогабаритные детали — головка и нижняя часть массой 350—400 г — устанавливаются вручную, подача наиболее тяжелой части — трубы, масса которой составляет около 5 кг, осуществляется с помощью механической

руки. Зажатые детали приводятся в соприкосновение и затем разводятся, образуя рабочие зазоры между головкой и трубой, трубой и нижней частью. Предварительно от сварочных выпрямителей типа ВДГ-601 подается напряжение холостого хода и возбуждаются две дуги соответственно между головкой и одним торцом трубы, между вторым торцом трубы и нижней частью. Обе дуги горят в течение времени, необходимого для разогрева торцов до сварочной температуры.

По истечении выдержки времени разогрева производится осадка. После осадки зажимы головки и нижней части освобождают эти детали и возвращаются в исходное положение, а сваренный плунжер с помощью механической руки выгружается на лоток готовой продукции.

Механизмы зажатия — независимые, один неподвижный — для зажатия трубы *1* и два подвижных — для зажатия нижней части *7* и головки *11*. Усилие зажатия в неподвижном зажиме создается мультипликатором *2*.

Подвижные механизмы выполнены поворотными, в исходном положении при загрузке заготовок зажимы установлены в вертикальном положении. Зажатие заготовок производится с помощью кулачковых механизмов. Перевод подвижных механизмов в горизонтальное положение осуществляется пневмоцилиндрами поворота *6*, а продольные перемещения производятся пневмоцилиндрами *3*. Для разведения зажатых заготовок головки и нижней части после соприкосновения с трубой на расстояние, равное величине рабочих зазоров, при разогреве предусмотрены два клиновых механизма *5*. Клинья механизмов вводятся при сведенных заготовках, ограничивая обратный ход механизмов зажатия.

Осадка осуществляется четырьмя сдвоенными пневматическими цилиндрами *4*, по два на осадку каждой пары заготовок — нижней части и трубы, трубы и головки. Для защиты оператора от брызг металла предусмотрен экран *10*.

Для механизированной загрузки заготовок труб и выгрузки сваренного изделия имеется загрузочное устройство *9*, включающее в себя механическую руку, лоток заготовок и лоток готовой продукции *8*, размещенные в центральной части установки в зоне механизма зажатия трубы.

Механическая рука осуществляет захват трубы с лотка заготовок, поворот, опускание ее в открытый зажим.

После сварки рука поднимает плунжер на уровень лотка готовой продукции и укладывает его на лоток, а затем поднимается на уровень лотка заготовок и устанавливается над следующей заготовкой. Перемещение механической руки производится с помощью пневматических цилиндров.

Система возбуждения магнитного поля представляет собой два кольцевых неразъемных магнита, установленных со стороны подвижных механизмов зажатия, и два разъемных — со стороны трубы. Установка комплектуется шкафом управления.

Установка типа УДК-11401 (рис. 7.12) предназначена для сварки трубопроводов. Конструкция установки проходного типа, т. е. подача отдельных труб и перемещение сваренных секций труб производятся в направлении продольной оси установки. Механизмы зажатия и система возбуждения магнитного поля — неразъемные.

Неподвижный механизм зажатия *4* закреплен на станине, которая является несущей частью всей установки, а подвижный механизм зажатия *5* перемещается по направляющему устройству. Оба механизма зажатия состоят каждый из двух гидравлических цилиндров, штоки которых направлены навстречу друг другу. Штоки цилиндров воздействуют на ползуны и через систему рычагов на вкладыши с зажимными губками. К торцам механизмов зажатия крепятся корпуса магнитов. Перемещение подвижного зажима обеспечивает образование рабочего зазора между свариваемыми трубами и осадку после их разогрева за счет усилия, создаваемого многопоршневыми гидравлическими цилиндрами *7*.

Для продольного перемещения отдельных труб и сваренных секций в установке имеются рольганги *3*, подающий и приемный, с приводом, состоящим из двух гидромоторов, двух дросселей и распределителей. Рольганги обеспечивают захват трубы с помощью двух гидроцилиндров. Скорость продольного перемещения труб регулируется дросселями.

Для поддержания и передачи поступательного перемещения заготовки трубы предусмотрены ролики — левые *2* и правые *9*. Регулирование уровня роликов при сварке труб различных диаметров производится винтовыми подъемниками.

Питание гидравлической системы установки обеспечивается насосной станцией *1*. Для защиты оператора от

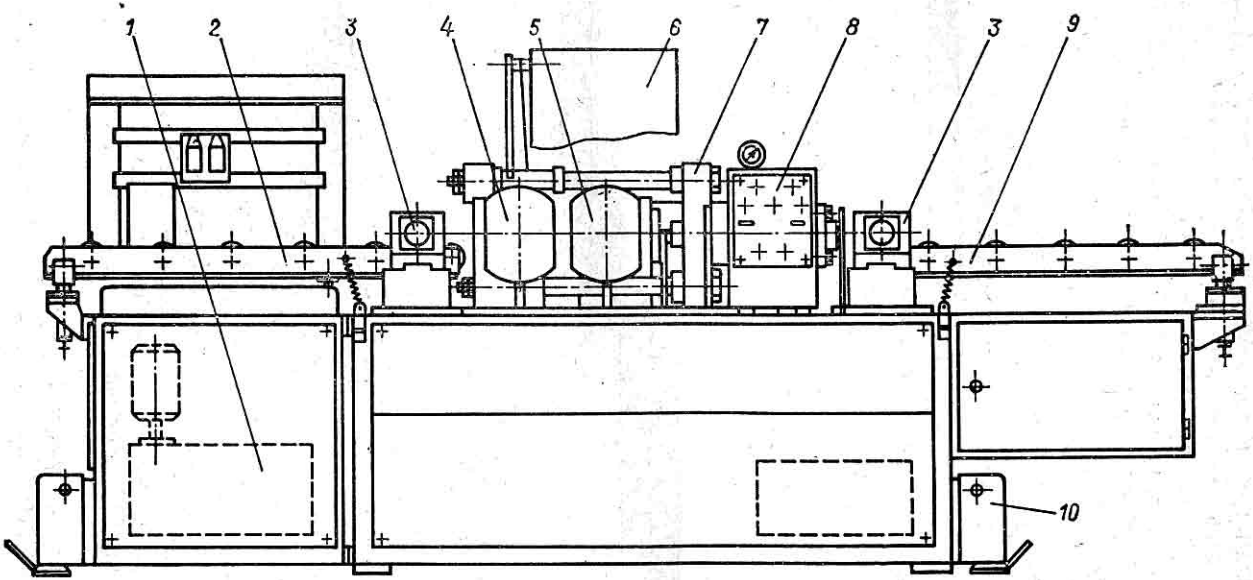


Рис. 7.12. Установка типа УДК-11401

искр при горящей дуге служит экран *6*. Управление процессом сварки осуществляется с пульта *8*.

Технологический процесс сварки секций осуществляется следующим образом. Со стеллажа заготовок труба подается на подающий рольганг и по роликам через механизмы зажатия и систему возбуждения магнитного поля перемещается в направлении приемного рольганга. В момент прохождения торца трубы, подлежащего сварке, через центр системы возбуждения магнитного поля опускается поворотный упор. Обратным движением труба доводится до упора и зажимается в неподвижном зажиме. Одновременно с зажатием трубы упор возвращается в исходное положение. На освободившееся место со стеллажа подается вторая труба, она доводится до соприкосновения с первой и зажимается в подвижном зажиме. После возбуждения дуги трубы разводятся на величину рабочего зазора, в котором вращающаяся дуга разогревает торцы до сварочной температуры. После разогрева торцов осуществляется осадка; сваренная двухтрубная секция освобождается от зажимов и по роликам *9* перемещается влево, освобождая место для приема следующей трубы.

Для удобства работы в установке имеются подъемники *10*, служащие для подъема или опускания установки с целью совмещения ее горизонтальной оси с осью стеллажей.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

СВАРОЧНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

8.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Назначение. Источники переменного тока находят широкое применение при ручной дуговой сварке штучными электродами, при механизированной сварке под флюсом и при аргонодуговой сварке легких сплавов.

Основным узлом современных источников переменного тока является специальный, как правило, однофазный сварочный трансформатор той или иной конструкции. Трансформатор разделяет сварочную цепь и силовую

сеть, понижает напряжение сети до необходимого для сварки значения, самостоятельно или в комплекте с дополнительными устройствами обеспечивает формирование требуемых статических внешних характеристик и регулирование сварочного тока. По этому основному узлу источники переменного тока часто называют просто сварочными трансформаторами.

Конструкции собственно сварочных трансформаторов весьма разнообразны. В зависимости от способа регулирования сварочного тока их можно подразделить на три группы устройств:

устройства, связанные с применением подвижных магнитопроводов и обмоток;

устройства, связанные с подмагничиванием магнитопроводов постоянным током;

устройства тиристорного регулирования.

Статические характеристики. Статической внешней характеристикой источника называют зависимость напряжения вторичной цепи от тока $U_2 = f(I_2)$. Ток вторичной цепи является сварочным током. Вторичное напряжение при разомкнутой сварочной цепи называется напряжением холостого хода U_{20}, а при некотором значении сварочного тока — рабочим напряжением на зажимах источника.

Условно внешние характеристики подразделяются на крутопадающие (ПВХ) и пологопадающие (жесткие — ЖВХ). Вид внешних характеристик обычно связан с особенностями сварочного процесса, для которого предназначен источник.

Требования к виду внешних характеристик определяются такими показателями сварочного процесса, как тип электрода (плавящийся, неплавящийся), характер среды, в которой происходит сварка (открытая дуга, дуга под флюсом, в защитных газах), степень механизации процесса (ручная, полуавтоматическая, автоматическая сварка), способ регулирования режима горения дуги (саморегулирование, автоматическое регулирование напряжения дуги).

Так, для ручной дуговой сварки покрытыми штучными электродами, аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом, механизированной сварки под флюсом на автоматах с регулированием скорости подачи электродной проволоки в зависимости от напряжения дуги используются ПВХ (рис. 8.1, *а*). При ПВХ источник работает в режиме регулятора сварочного тока. При этом сварочный ток

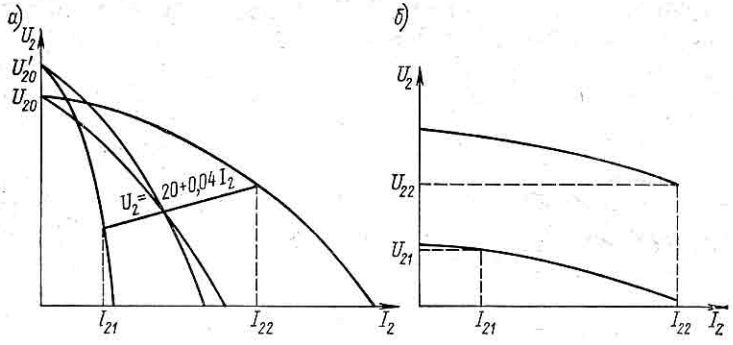


Рис. 8.1. Внешние характеристики

может регулироваться в заданном диапазоне от минимального I_{21} до максимального I_{22} значения плавно или ступенями. По технологическим (сварочным) и экономическим соображениям наиболее часто используется плавно-ступенчатое регулирование, когда две (или более) ступени регулирования сочетаются с плавным регулированием тока внутри каждой ступени. Регулирование сварочного тока при ПВХ производится при приблизительном постоянстве напряжения холостого хода U_{20}. Часто при плавно-ступенчатом регулировании переход на ступень малых токов сопровождается повышением напряжения холостого хода U'_{20}.

Каждому значению сварочного тока соответствует определенное условное значение рабочего напряжения. Так, при ручной дуговой сварке штучными электродами согласно требованию ГОСТ 95—77 рабочее напряжение (в вольтах) и сварочный ток связаны соотношением

$$U_2 = 20 + 0{,}04 I_2.$$

Каждому виду сварки соответствует определенная крутизна наклона ПВХ. Так, например, наиболее крутые характеристики используются для аргонодуговой сварки, более пологие — для ручной сварки штучными электродами, еще более пологие — для сварки под флюсом.

Регулирование длины дуги в процессе сварки при ПВХ осуществляется рукой сварщика или системой регулирования длины дуги сварочного автомата.

При автоматической сварке под флюсом при постоянной, не зависящей от напряжения дуги скорости подачи электродной проволоки используются ЖВХ (рис. 8.1, *б*).

Источник питания при ЖВХ работает как регулятор напряжения. Рабочее напряжение регулируется в заданных пределах от минимального U_{21} до максимального U_{22} значения, причем диапазон регулирования его выбирается в строгом соответствии с заданным диапазоном сварочного тока от I_{21} до I_{22}. Регулирование напряжения при ЖВХ также может быть плавным, ступенчатым и смешанным. Значение сварочного тока определяется скоростью подачи электродной проволоки, а источник питания задает напряжение дуги и обеспечивает саморегулирование длины дуги.

В трансформаторах для сварки под флюсом согласно ГОСТ 7012—77 рабочее напряжение (в вольтах) и сварочный ток связаны соотношением:

для трансформаторов на номинальный ток 1000 А

$$U_2 = 19 + 0{,}037I_2;$$

для трансформаторов на номинальный ток 2000 А

$$U_2 = 13 + 0{,}0315I_2.$$

Особенности горения дуги переменного тока. При питании сварочной дуги переменным током полярность электродов, а также условия существования дугового разряда периодически изменяются. В конце каждого полупериода сварочного тока дуга гаснет, температура и электропроводность дугового промежутка снижаются. Повторное зажигание дуги в новом полупериоде происходит при повышенном напряжении, называемом напряжением повторного зажигания $U_з$. Значение напряжения повторного зажигания зависит от множества факторов, и в частности от теплофизических свойств и геометрии электродов, от наличия в дуговом промежутке паров легкоионизирующихся элементов, от длины дуги и сварочного тока.

Из-за различных теплофизических свойств и условий охлаждения электрода и изделия условия существования дугового разряда и условия повторного возбуждения дуги в соседние полупериоды весьма разнообразны. В те полупериоды, когда катодом является изделие, напряжение повторного зажигания может превосходить нормальное напряжение горения дуги в несколько раз. Особенно высокие пики напряжения повторного зажигания имеют место при аргонодуговой сварке вольфрамовым электродом легких сплавов в полупериоды, когда происходит формирование катода на изделии.

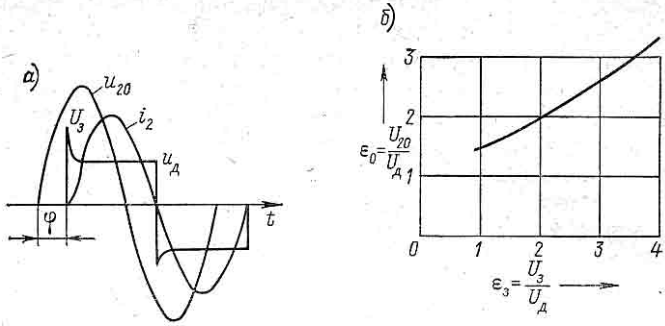


Рис. 8.2. Кривые сварочного тока, напряжения дуги и зависимость $\varepsilon_0 = f(\varepsilon_з)$

На устойчивость и скорость повторного зажигания дуги существенное влияние оказывают параметры источников питания. К таким параметрам прежде всего относятся напряжение холостого хода и скорость его восстановления после обрыва тока дуги, форма кривой сварочного тока, фазовый сдвиг между напряжением холостого хода источника и током дуги.

На рис. 8.2, *а* представлены типичные кривые тока и напряжения дуги при питании от стандартного сварочного трансформатора. Кривая u_{20} характеризует напряжение трансформатора при холостом ходе. При нагрузке в связи с наличием в сварочной цепи реактивного сопротивления сварочный ток i_2 отстает от напряжения u_{20} на угол φ. Если формирование разряда при повторном возбуждении дуги задержалось, т. е. электрическая цепь разорвалась, напряжение на дуговом промежутке $u_д$ стремится увеличиться до значения, соответствующего мгновенному значению напряжения холостого хода u_{20}. Благодаря сдвигу фаз это напряжение близко к своему амплитудному значению, что благоприятно сказывается на повторном зажигании дуги. Очевидно, что повышение напряжения на дуговом промежутке во время повторного зажигания дуги способствует повышению устойчивости ее горения.

Оптимальное значение напряжения холостого хода. Повысить напряжение на дуговом промежутке проще всего, увеличивая напряжение холостого хода трансформатора. Однако такой путь невыгоден, так как он приводит к увеличению массы и габаритов трансформатора, снижe-

нию его КПД и коэффициента мощности. Возрастает крутизна наклона внешних характеристик, что в ряде случаев, например при механизированной сварке под флюсом, снижает саморегулирование процесса сварки. Возрастает опасность поражения обслуживающего персонала электрическим током. Поэтому при проектировании сварочных трансформаторов необходимо выбирать минимальное соотношение между напряжением холостого хода и напряжением дуги $\varepsilon_0 = U_{20}/U_д$, обеспечивающее стабильное горение дуги переменного тока. Очевидно, что это соотношение в первую очередь зависит от напряжения зажигания и напряжения дуги: $\varepsilon_з = U_з/U_д$.

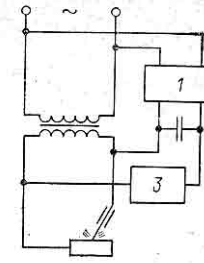


Рис. 8.3. Структурная схема импульсного генератора

Зависимость ε_0 от $\varepsilon_з$, полученная в работе [32], представлена на рис. 8.2, *б*. Как следует из приведенной зависимости, для значений $\varepsilon_з = 1{,}5 \ldots 3{,}0$, что имеет место при обычных условиях сварки, должно быть принято $\varepsilon_0 \geqslant 1{,}8 \ldots 2{,}5$. Зависимость, показанная на рис. 8.2, *б*, найдена в предположении чисто индуктивного характера сварочной цепи: $x_{св}/R_{св} \to \infty$. Однако, как показали расчеты, для реальных сварочных цепей, где $x_{св}/R_{св} \geqslant 5$, соотношение $\varepsilon_0 = f(\varepsilon_з)$, вычисленное по уточненным формулам, мало отличается от приведенного.

Отметим, что даже при отсутствии пиков напряжения повторного зажигания ($\varepsilon_з = 1$) отношение напряжения холостого хода к напряжению дуги для обеспечения устойчивого горения дуги, а также возможности ее некоторого удлинения при сварке должно быть не ниже 1,57 ($\varepsilon_0 = U_{20}/U_д \geqslant 1{,}57$).

Импульсная стабилизация горения дуги. Экономичным и эффективным путем повышения устойчивости горения дуги является кратковременное повышение напряжения на дуговом промежутке, только на время повторного возбуждения дуги, с помощью специальных устройств — импульсных генераторов.

Вариант структурной схемы импульсного генератора представлен на рис. 8.3. Накопительный конденсатор *2* заряжается до зарядно-разделительного устройства *1*, и в момент повторного возбуждения дуги разряжается на дуговой промежуток через разрядное устройство *3*.

Поскольку фаза перехода сварочного тока через нуль во время сварки не остается строго постоянной, необходимо, чтобы разрядное устройство обеспечивало синхронизацию времени разряда конденсатора с моментом перехода тока (или напряжения дуги) через нуль.

Импульсные генераторы уже многие годы находят широкое применение при аргонодуговой сварке легких сплавов, где повторное зажигание дуги в полупериоды обратной полярности (катод — изделие) очень затруднено. Пики напряжения повторного зажигания при этом способе сварки достигают 200—250 В и значительно превышают допустимое по условиям безопасности напряжение трансформатора. Для успешной работы сварочной установки напряжение стабилизирующих импульсов должно составлять 500—600 В, амплитуда тока импульсов 60—80 А, длительность не ниже 60 мкс. Импульсы должны генерироваться через 50—100 мкс после смены полярности дугового напряжения.

Несмотря на большую эффективность, импульсные генераторы при других способах сварки широкого распространения пока не получили из-за относительной сложности синхронизации импульсов. Однако в разработанных во ВНИИЭСО тиристорных сварочных трансформаторах импульсная стабилизация существенно упрощается. Такие стабилизаторы будут рассмотрены ниже совместно с тиристорными трансформаторами.

Скорость нарастания напряжения на дуговом промежутке при обрыве сварочного тока. Известно, что скорость нарастания напряжения на дуговом промежутке (при обрыве сварочного тока в предыдущем полупериоде) определяется его проводимостью. При этом происходит своеобразное саморегулирование процесса повторного зажигания: чем быстрее убывает проводимость, тем больше скорость нарастания напряжения.

При полном разрыве сварочной цепи напряжение на электродах должно мгновенно возрасти до текущего значения напряжения холостого хода трансформатора $U_m \sin \varphi$. Однако в реальных сварочных трансформаторах вследствие демпфирующего действия вихревых токов, возникающих в магнитопроводах и конструктивных элементах трансформатора, процесс нарастания напряжения происходит в два этапа: сначала мгновенно до значения $U_m \sin \varphi - \Delta U$ и далее по экспоненте (рис. 8.4, *а*). Величина ΔU и время затухания $t_з$ определяются пара-

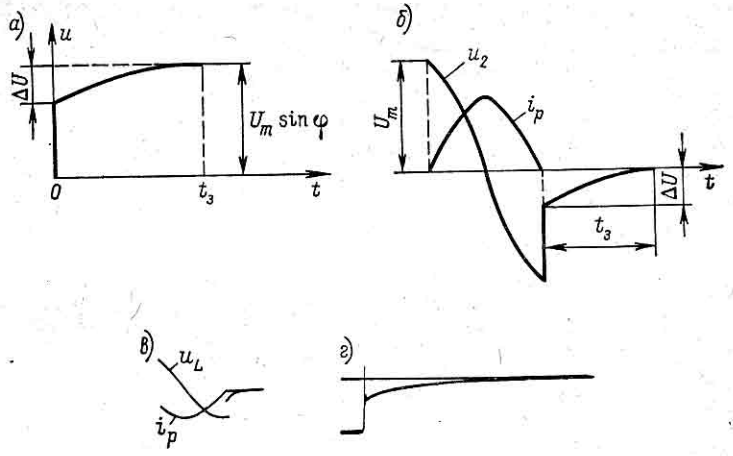


Рис. 8.4. Кривые напряжения на вторичной обмотке трансформатора и разрядного тока

метрами эквивалентных контуров вихревых токов.

Скорость нарастания напряжения, измеренная непосредственно на дуговом промежутке во время сварки, не может характеризовать динамические свойства сварочных трансформаторов, так как на нее существенно влияет остаточная проводимость дугового промежутка. Поэтому сравнение динамических свойств трансформаторов предложено [26] производить на физической модели. Первичная обмотка исследуемого сварочного трансформатора замыкается накоротко, а вторичная обмотка подсоединяется через переключатель полярности и тиристор к предварительно заряженному конденсатору. Кривая разрядного тока $i_р$ представляет собой полуволну синусоиды (рис. 8.4, *б*). Под действием разрядного тока создается поле рассеяния, которое наводит вихревые токи в элементах конструкции трансформатора. В конце полупериода разряда вследствие односторонней проводимости тиристора происходит обрыв тока и создаются условия, свойственные сварочной цепи в начале каждого полупериода сварки. Спад напряжения u_2 на вторичной обмотке происходит сначала скачком, а потом по экспоненте.

Величина ΔU и время $t_з$ характеризуют динамические свойства сварочных трансформаторов; очевидно, чем больше эти величины, тем хуже динамические свойства.

Таблица 8.1

Параметры		ТД-500	СТШ-500	ТСГП-200	УДГ-301	УДАР-300
$\frac{\Delta U}{U_m}$, %	Режим номинального тока	35	39	12	21	39
	Режим минимального тока	36	24	12	50	57
$t_з$, мкс	Режим номинального тока	240	240	60	120	180
	Режим минимального тока	260	220	65	140	220

Во ВНИИЭСО проведена сравнительная оценка динамических свойств различных конструкций сварочных трансформаторов. Исследовались массовые трансформаторы с подвижными катушками ТД-500 и подвижным шунтом СТШ-500, а также трансформаторы с подмагничиванием установок аргонодуговой сварки УДГ-301, УДАР-300 и трансформаторы экспериментальных установок ТСГП-200 с прямоугольной формой кривой тока.

Характер изменения напряжения u_2 на вторичной обмотке трансформатора и разрядного тока $i_р$ регистрировался двухлучевым импульсным осциллографом с калиброванной длительностью развертки. Типичные осциллограммы процесса приведены на рис. 8.4, *в*. Ввиду того что для оценки динамических свойств источников необходим только конечный участок кривой u_2 с момента обрыва разрядного тока, этот участок осциллографировался при больших скоростях развертки (рис. 8.4, *г*).

Результаты исследований (табл. 8.1) показывают, что исключительно высокие динамические свойства во всем диапазоне регулирования имеет источник ТСГП-200 с дросселем насыщения на тороидальных магнитопроводах, что согласуется с его высокими сварочными показателями. Его динамические свойства существенно выше, чем у признанных сварочных трансформаторов с механическим регулированием (ТД, СТШ).

Динамические свойства источников установок УДГ-301 и УДАР-300 существенно зависят от режима (от тока подмагничивания).

Форма кривой сварочного тока. Устойчивость процесса сварки на переменном токе в значительной степени зависит от формы кривой сварочного тока. При искажении формы кривой тока относительно синусоидальной, с замедлением его прохождения через нулевые значения, наблюдается снижение стабильности горения дуги. При изменении формы тока до синусоидальной и далее до трапецеидальной и прямоугольной устойчивость горения дуги возрастает.

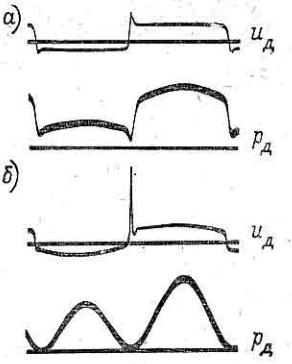


Рис. 8.5. Осциллограммы мощности и напряжения дуги. Режим сварки 180 А, 16 В

Это явление полностью согласуется с современными представлениями о физических процессах, происходящих при повторном возбуждении открытых дуг переменного тока. Как известно, основным механизмом развития открытой дуги в начале каждого полупериода переменного тока является разогрев дугового газа после некоторого его охлаждения при смене полярности. Все меры, способствующие ускорению нагрева газа после перехода тока через нуль, направлены на повышение стабильности дуг.

На рис. 8.5 представлены осциллограммы мощности $p_д$ и напряжения $u_д$ дуги при аргонодуговой сварке от источника с прямоугольной (*а*) и синусоидальной (*б*) формой тока. Более равномерное распределение мощности дуги в источнике с прямоугольной формой тока сопровождается снижением пика напряжения повторного зажигания.

Надежное повторное зажигание дуги в источниках с тиристорным фазовым регулированием при искажении формы кривой сварочного тока практически невозможно без использования импульсных генераторов.

Постоянная составляющая тока. Различие физических свойств электрода и изделия, особенно сильное, например, при сварке вольфрамовым электродом алюминиевых сплавов, приводит к тому, что напряжение дуги в одном полупериоде резко отличается от напряжения

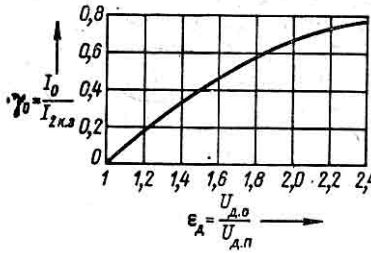


Рис. 8.6. Зависимость $\gamma_0 = f(\varepsilon_д)$

дуги в другом полупериоде. При этом, если не принять специальных ограничительных мер, в сварочной цепи возникнет значительная постоянная составляющая тока. Зависимость относительного значения постоянной составляющей сварочного тока $\gamma_0 = I_0/I_{2к.з}$ от соотношения дуговых напряжений обратной и прямой полярности $\varepsilon_д = U_{д.о}/U_{д.п}$, приведенная на рис. 8.6, соответствует соотношению $U_{д.о}/U_{20} = 0{,}5$.

Следует отметить, что напряжение холостого хода незначительно влияет на постоянную составляющую тока, причем увеличение соотношения $U_{д.п}/U_{20}$ сопровождается снижением величины γ_0.

Постоянная составляющая сварочного тока создает в трансформаторе постоянное магнитное поле, вызывающее рост намагничивающего тока, снижение отдаваемой трансформатором мощности и коэффициента мощности. Значительная постоянная составляющая тока отрицательно сказывается на технологии сварки.

Среди многих известных способов устранения или ограничения постоянной составляющей тока практическое применение находит только один — включение в сварочную цепь громоздкой и дорогостоящей конденсаторной батареи, препятствующей протеканию в цепи постоянного тока.

В последние годы предложено новое, компактное и экономичное диодно-тиристорное устройство для ограничения постоянной составляющей тока [6]. Устройство прошло промышленные испытания и внедрено в установках аргонодуговой сварки УДГ-301-1 и УДГ-501-1. Оно будет рассмотрено ниже, в § 8.4.

Компенсация реактивной мощности. Сварочные трансформаторы являются потребителями энергии с низким коэффициентом мощности. Коэффициент мощности трансформаторов для ручной дуговой сварки, которые обычно не отключаются от сети при холостом ходе, можно увеличить, подключив параллельно первичной обмотке трансформатора косинусный конденсатор соответству-

ющей мощности. Средневзвешенный коэффициент мощности такого трансформатора, работающего при продолжительности нагрузки ПН = 0,6, может быть определен по формуле

$$\cos\varphi_{\text{ср в}} = \frac{P_{1\text{н}}\cdot 0{,}6 + P_0\cdot 0{,}4}{(P_{1\text{н}}\cdot 0{,}6 + P_0\cdot 0{,}4)^2 + [(Q_{1\text{x}} - Q_C)\cdot 0{,}6 + (Q_{1\text{x}0} - Q_C)\cdot 0{,}4]^2},$$

где $P_{1\text{н}}$, P_0 — активная мощность трансформатора при нагрузке и холостом ходе; $Q_{1\text{x}}$, $Q_{1\text{x}0}$ — реактивная мощность при нагрузке и холостом ходе без конденсатора; Q_C — мощность конденсатора.

Коэффициент мощности трансформатора ТД-502 на ток 500 А с конденсатором мощности Q_C = 9,4 квар, работающего при номинальной нагрузке, составляет 0,86, средневзвешенный коэффициент мощности при работе с ПН = 0,6 равен 0,98. Те же значения при работе без конденсатора равны соответственно 0,71 и 0,7.

8.2. СВАРОЧНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ С МЕХАНИЧЕСКИМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ

В эту группу источников входят трансформаторы с увеличенным магнитным рассеянием, а именно трансформаторы с подвижными обмотками и с подвижными магнитными шунтами, и трансформаторы с нормальным магнитным рассеянием, работающие в комплекте с дополнительной реактивной катушкой — дросселем.

Основной признак этой группы источников — наличие подвижных частей — является и основным ее недостатком. На подвижные части регулирующих устройств действуют электромагнитные силы, пульсирующие от нуля до максимума с двойной частотой сети; значение этих сил пропорционально квадрату тока и изменяется с изменением режима работы трансформатора. Электромагнитные силы вызывают вибрацию подвижных частей регулирующих устройств. Амплитуды колебаний зависят от массы подвижных частей, точности и качества сборки, жесткости крепления и других факторов. Даже при хорошей проработке конструкций и высоком качестве изготовления повышенные вибрации являются основной причиной, ограничивающей срок службы подобных источников.

Другим недостатком этих источников является инерционность регулирования и трудность осуществления

дистанционного и программного управления, так как регулирование здесь производится вручную или при помощи сервоприводов.

Однако, несмотря на отмеченные недостатки, эти трансформаторы получили самое широкое распространение во всем мире как основной источник питания для ручной дуговой сварки штучными электродами из-за малого расхода активных материалов, высоких энергетических и сварочных показателей, простоты и дешевизны конструкций. До настоящего времени в ряде стран (Япония, ФРГ и др.) такие трансформаторы выпускаются и для автоматической сварки под флюсом. Однако в последние годы из-за ряда отмеченных недостатков, затрудняющих выполнение автоматической сварки, наметилась их замена более совершенными конструкциями.

Трансформаторы с подвижными обмотками. Трансформаторы с развитым магнитным рассеянием и подвижными обмотками выполняются с магнитопроводами броневого (рис. 8.7, *а*, *б*, *в*) и стержневого (рис. 8.7, *г*) типа. Обмотки броневого трансформатора могут быть цилиндрическими или дисковыми, обмотки стержневого трансформатора, как правило, только дисковые.

Развитое магнитное рассеяние трансформаторов достигается за счет развитой проводимости между стержнями магнитной системы и расположения первичной *1* и вторичной *2* обмоток вдоль стержней *3* магнитопровода на некотором расстоянии друг от друга (рис. 8.7).

Одна из обмоток трансформатора, обычно первичная, выполняется неподвижной, другая — подвижной. Перемещение подвижной обмотки осуществляется ходовым винтом. Реактивное (индуктивное) сопротивление трансформатора и, следовательно, сварочный ток изменяются при изменении расстояния между обмотками. Полностью сдвинутым обмоткам соответствует минимальное индуктивное сопротивление и, следовательно, максимальный сварочный ток.

В трансформаторах броневого типа с цилиндрическими катушками подвижная обмотка часто имеет меньшие радиальные размеры и может входить внутрь неподвижной обмотки (рис. 8.7, *а*, *б*). При увеличении расстояния между обмотками индуктивное сопротивление возрастает и сварочный ток падает. Для расширения пределов регулирования тока в отдельных конструкциях трансформаторов наряду с подвижной обмоткой используются не-

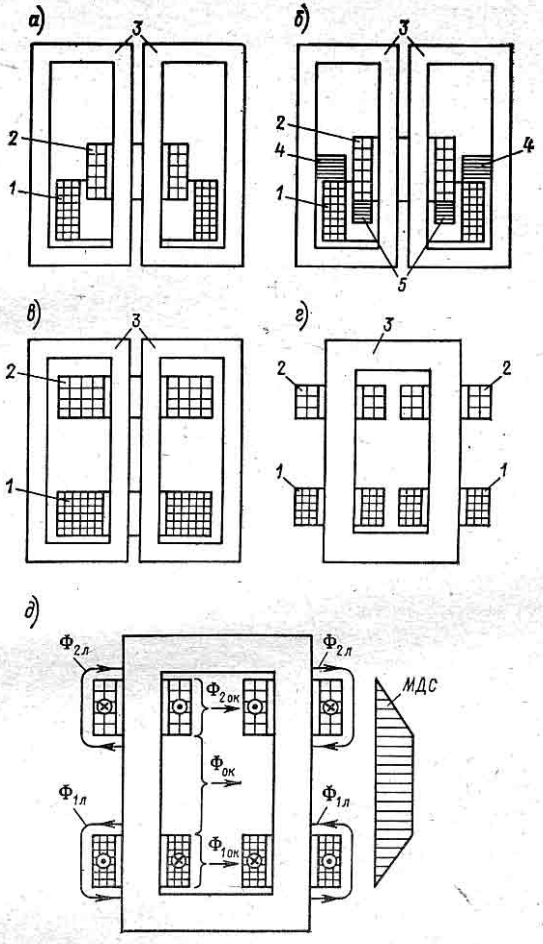


Рис. 8.7. Конструкции трансформаторов с подвижными обмотками и упрощенная картина поля рассеяния трансформатора

большие магнитные шунты *4*, *5* (рис. 8.7, *б*). Когда подвижные шунты *5* совмещаются с неподвижными *4*, индуктивное сопротивление резко возрастает. Расчеты и эксперименты показали, что все известные модификации трансформаторов броневого типа уступают по удельным расходам активных материалов и по КПД трансформаторам стержневого типа. Поэтому трансформаторы стержне-

вой конструкции (рис. 8.7, *г*) получили самое широкое распространение в отечественных сварочных трансформаторах для ручной дуговой сварки.

Эта же конструкция трансформатора с жестко закрепленными, но разнесенными относительно друг друга первичными и вторичными обмотками является основной как для трансформатора с магнитными шунтами, подвижными и управляемыми постоянным током, так и для источников с тиристорным регулированием.

Для трансформатора с подвижными обмотками характерна некоторая зависимость напряжения холостого хода от расстояния между обмотками. При раздвижении обмоток вследствие рассеяния части основного магнитного потока по воздуху в окне между стержнями напряжение холостого хода снижается на 3—6 % относительно значения, получаемого при сдвинутых обмотках.

Следует отметить, что индуктивное сопротивление в зависимости от расстояния между обмотками изменяется по линейному закону и, следовательно, сварочный ток изменяется обычно пропорционально расстоянию между обмотками. При большом раздвижении обмоток эффективность регулирования тока снижается при непрерывном росте массы магнитопровода. Поэтому большой диапазон плавного регулирования в трансформаторах с подвижными обмотками нецелесообразен.

Для расширения пределов регулирования тока при ограничении массы магнитопровода применяется плавно-ступенчатое регулирование путем одновременного переключения числа витков первичной и вторичной обмоток с сохранением постоянства коэффициента трансформации или с некоторым его снижением в диапазоне малых токов.

Схемы трансформаторов с плавно-ступенчатым регулированием приведены на рис. 8.8, *а*, *б*, *в*. На рис. 8.8, *г* представлены регулировочные характеристики трансформаторов, т. е. зависимости вторичного (сварочного) тока от расстояния между обмотками $I_2 = f(\xi)$.

Необходимым условием плавно-ступенчатого регулирования является стыковка между двумя диапазонами тока. ГОСТ 95—77 допускает небольшой разрыв токов при переходе с одного диапазона на другой — не более 7,5 %.

Две ступени регулирования для трансформатора по схеме рис. 8.8, *а* соответствуют параллельному или после-

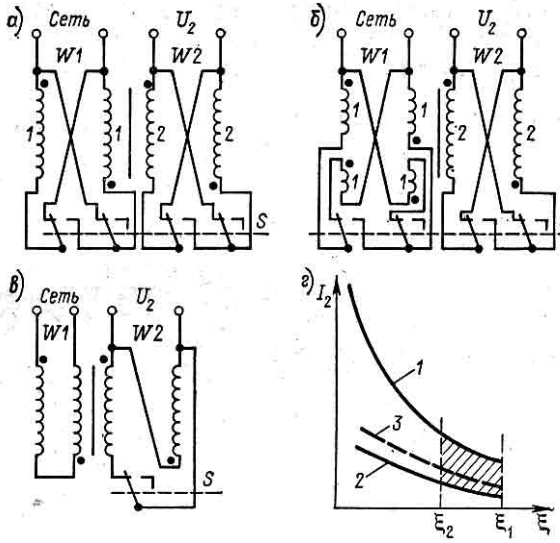


Рис. 8.8. Схемы трансформаторов с плавно-ступенчатым регулированием (*а*, *б*, *в*) и регулировочные характеристики трансформаторов (*г*)

довательному соединению катушек обмоток на разных стержнях. При этом напряжение холостого хода не изменяется, а индуктивное сопротивление обмоток изменяется в четыре раза. Регулировочные характеристики этого трансформатора для двух ступеней регулирования приведены на рис. 8.8, *г* (кривые *1* и *2*). Чтобы получить стыковку между двумя диапазонами токов в этом трансформаторе, необходимо иметь кратность регулирования не менее 1 к 4 в каждом диапазоне токов. При этом общая кратность регулирования тока составляет 1 к 16. Такое глубокое регулирование тока на практике не используется.

Для уменьшения высоты магнитопровода, массы и габаритов трансформатора в целом во ВНИИЭСО разработана схема трансформатора (рис. 8.8, *б*) с частичным отключением витков катушек первичной обмотки при переходе с параллельного их соединения на последовательное. Напряжение холостого хода в диапазоне малых токов повышается, что благоприятно сказывается на стабильности горения дуги. На рис. 8.8, *г* регулировочные характеристики *1* и *3* соответствуют схеме трансформатора с частичным отключением витков.

Чтобы получить перекрытие ступеней токов, достаточно раздвигать обмотки на расстояние ξ_2, а не ξ_1, как у трансформаторов по схеме рис. 8.8, *а*. Габариты магнитопровода при этом могут быть снижены на 20—25 % пропорционально разности $\xi_1 - \xi_2$.

На рис. 8.8, *в* приведена схема трансформатора, в котором катушки первичной обмотки включены последовательно. Катушки вторичной обмотки на ступени больших токов включены параллельно, а при переходе на ступень малых токов одна катушка вторичной обмотки отключается. При этом в конкретных конструкциях трансформаторов (переносные сварочные трансформаторы ТД-102, ТД-306) с учетом поля рассеяния, замыкающегося на металлический кожух, индуктивное сопротивление трансформатора изменяется примерно в два раза.

Индуктивное сопротивление трансформатора. При расчете сварочного трансформатора к числу основных исходных данных относятся пределы регулирования сварочного тока, которые непосредственно связаны с индуктивным сопротивлением трансформатора. Максимальному сварочному току соответствует минимальное индуктивное сопротивление x_{min} (обмотки полностью сдвинуты), минимальному сварочному току — максимальное x_{max} (обмотки раздвинуты).

Рассмотрим картину магнитного поля рассеяния трансформатора стержневого типа (рис. 8.7, *д*), справа на рисунке показана эпюра магнитодвижущих сил трансформатора. Реальное поле рассеяния трансформатора можно представить как сумму трех составляющих: поля рассеяния в лобовых частях обмоток ($\Phi_{1л}$, $\Phi_{2л}$), поля рассеяния в окне трансформатора в зоне катушек ($\Phi_{1ок}$, $\Phi_{2ок}$) и поля рассеяния в зазоре между обмотками $\Phi_{ок}$. Поле $\Phi_{ок}$ уже при небольшом расстоянии от обмоток с большой степенью точности может быть представлено как плоскопараллельное поле; при этом можно считать, что магнитные силовые линии поля замыкаются по воздуху между стержнями магнитной системы в плоскостях, перпендикулярных осям стержней.

Магнитная проводимость λ при $\mu = 1$ между стержнями магнитной системы, отнесенная к единице длины, определяется экспериментально и может быть представлена эмпирической зависимостью

$$\lambda = 1{,}5 + 1{,}2\frac{b}{c_{ок}},$$

где b — размер магнитопровода в направлении набора; $c_{ок}$ — ширина окна магнитопровода.

В соответствии с картиной поля рассеяния индуктивное сопротивление трансформатора также может быть представлено как сумма трех составляющих:

$$x = x_{ок} + x_{л} + x_{\xi}.$$

Составляющие $x_{ок}$ и $x_{л}$ не зависят от расстояния между обмотками и соответствуют магнитному полю в окне трансформатора ($\Phi_{1ок}$, $\Phi_{2ок}$) и в лобовых частях ($\Phi_{1л}$, $\Phi_{2л}$) при полностью сдвинутых обмотках ($\xi = 0$). Составляющая x_{ξ} соответствует магнитному полю в окне трансформатора в зазоре между обмотками и связана с расстоянием между обмотками ξ прямо пропорциональной зависимостью.

Ниже приводятся формулы для расчета индуктивного сопротивления рассеяния, отнесенного ко вторичным обмоткам с числом витков w_2 [32]. Формулы получены в предположении, что магнитная проницаемость магнитопровода бесконечна, отсутствует демпфирующее влияние вихревых токов, ток в витках распределен равномерно.

Индуктивное сопротивление

$$x_{ок} = \frac{1}{3}\omega\mu_0 w_2^2 \lambda (h_1 + h_2),$$

где $\omega = 2\pi f$ — угловая частота, $с^{-1}$; $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ — магнитная постоянная, Гн/м; h_1 и h_2 — высота катушек первичной и вторичной обмоток, м.

Индуктивное сопротивление

$$x_{л} = \frac{1}{2\pi}\omega\mu_0 w_2^2 l_{л} \ln \frac{g_{12}^2}{g_1 g_2},$$

где $l_{л}$ — условная средняя длина витка катушек в лобовой части, м; g_1, g_2, g_{12} — средние геометрические расстояния, м.

Величины $l_{л}$ и g_1, g_2, g_{12} определяются по следующим соотношениям:

$$l_{л} = (l_{1ср} + l_{2ср})/2,$$

где $l_{1ср}$, $l_{2ср}$ — средняя длина витка катушек первичной и вторичной обмоток, м;

$$g_1 = 0{,}223\,(2c_1 + h_1); \quad g_2 = 0{,}223\,(2c_2 + h_2),$$

где c_1, c_2 — размеры катушек по ширине вне окна магнитопровода с учетом вентиляционных каналов и каналов между катушками и магнитопроводом, м;

$$g_{12} = 2c_{\text{ср}}\,[0{,}22 + 0{,}75h_{\text{ср}}/(2c_{\text{ср}})] \text{ при } 1 < 2c_{\text{ср}}/h_{\text{ср}} < \infty,$$

где $c_{\text{ср}} = (c_1 + c_2)/2$; $h_{\text{ср}} = (h_1 + h_2)/2$.

Индуктивное сопротивление

$$x_\xi = \omega\mu_0\omega_2^2\lambda\xi.$$

При расчете минимального индуктивного сопротивления трансформатора $x_{\min}$ (при полностью сдвинутых обмотках) составляющая x_ξ определяется с учетом минимального расстояния между обмотками, необходимого по конструктивным соображениям. Максимальное индуктивное сопротивление $x_{\max}$ рассчитывается при максимальном расстоянии между обмотками.

Приведенные соотношения соответствуют параллельному включению обмоток трансформатора. При переходе к последовательному соединению ($w_2' = 2w_2$) индуктивное сопротивление возрастает в четыре раза.

Элементы расчета трансформатора. Исходными данными при расчете являются расчетная мощность трансформатора, продолжительность нагрузки, номинальный ток и пределы его регулирования, номинальное рабочее напряжение, напряжение холостого хода и тепловой режим, на который рассчитывается трансформатор (класс изоляции обмоток).

В последние годы созданы методики машинного расчета оптимальной геометрии трансформатора с учетом его регулировочных свойств, однако эти методики еще несовершенны, так как не учитывают постоянство теплового режима для всех просчитываемых вариантов. Поэтому до настоящего времени расчет ведется методом последовательных приближений. Предварительно определяются основные геометрические размеры трансформатора, а потом производится поверочный расчет всех заданных величин, и в первую очередь индуктивного сопротивления; затем уточняются геометрические размеры и т. д.

При плавно-ступенчатом регулировании поверочный расчет индуктивных сопротивлений и пределов регулирования тока производится для обоих ступеней (диапазонов).

Расчет выполняется в следующем порядке:

1. Минимальное и максимальное индуктивные сопротивления, обеспечивающие заданные пределы регулирования:

$$x_{\min} = \frac{\sqrt{U_{20}^2 - U_{22}^2}}{I_{22}}; \quad x_{\max} = \frac{\sqrt{U_{20}^2 - U_{21}^2}}{I_{21}},$$

где I_{22} и I_{21} — максимальный и минимальный ток нагрузки; U_{22} и U_{21} — рабочие напряжения, соответствующие токам нагрузки I_{22} и I_{21}, определяемые, например, по формуле $U_2 = 20 + 0{,}04I_2$ (в вольтах).

2. Числа витков обмоток. В сварочном трансформаторе выбор числа витков обмоток имеет принципиальное значение, так как витки определяют пределы регулирования сварочного тока. Для выбора числа витков обмоток w_1, w_2 рекомендуется пользоваться эмпирической зависимостью параметра e_w (в вольтах на виток) от расчетной мощности трансформатора (в киловольт-амперах), приведенной к длительному по нагреву току трансформатора:

$$e_w = 0{,}55 + 0{,}095P_{\text{дл}}.$$

Эта зависимость справедлива для широкого диапазона мощностей, однако наибольшую сходимость результатов дает в диапазоне 5—30 кВ·А. Мощность в киловольт-амперах

$$P_{\text{дл}} = U_{20}I_{2\text{ном}}\sqrt{\text{ПН}/100}\cdot 10^{-3},$$

где $I_{2\text{ном}}$ — номинальный вторичный ток, А; ПН — продолжительность нагрузки, %.

Числа витков обмоток:

$$w_1 = U_1/e_w; \quad w_2 = U_{20}/e_w,$$

где U_1 — напряжение сети, В.

3. Числа витков катушек. При параллельном соединении катушек

$$w_{1\text{к}} = w_1; \quad w_{2\text{к}} = w_2.$$

При последовательном соединении

$$w'_{1\text{к}} = w_1/2; \quad w'_{2\text{к}} = w_2/2.$$

4. Номинальный ток первичной обмотки в амперах

$$I_{1\text{ном}} = I_{2\text{ном}}k_{\mu}/n,$$

где $k_{\mu} = 1{,}05 \ldots 1{,}1$ — коэффициент, учитывающий намагничивающий ток трансформатора; n — коэффициент трансформации.

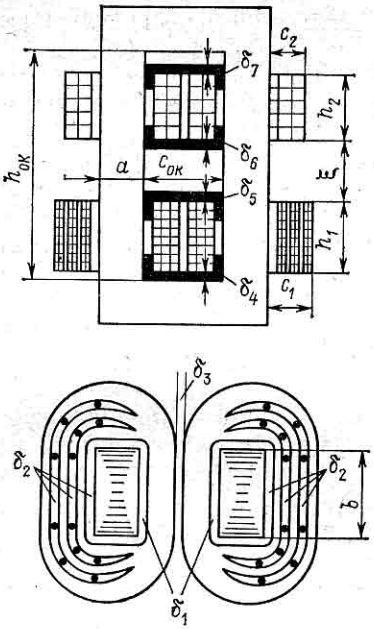


Рис. 8.9. К расчету геометрических размеров трансформатора

5. Сечение стали сердечника трансформатора в квадратных сантиметрах

$$S_c = \frac{U_{20} \cdot 10^4}{4{,}44 f w_2 B_m},$$

где B_m — индукция в сердечнике, Тл. Для холоднокатаной стали индукция может быть принята равной $B_m = 1{,}6 \ldots 1{,}7$ Тл.

6. Конструктивные размеры трансформатора. Расчет конструктивных размеров произведен применительно к стержневой конструкции, эскиз которой дан на рис. 8.9. Далее все линейные размеры приводятся в миллиметрах, сечения — в квадратных миллиметрах.

1) Ширина пластины стержня a и ширина окна $c_{ок}$ магнитопровода:

$$a = \sqrt{\frac{S_c \cdot 10^2}{p_1 k_c}}; \quad c_{ок} = \frac{b}{p_2},$$

где $p_1 = b/a = 1{,}8 \ldots 2{,}2$; $p_2 = 1{,}0 \ldots 1{,}2$; $k_c = 0{,}95 \ldots 0{,}97$ — коэффициент заполнения стали; b — высота набора пакета магнитопровода.

Значения коэффициентов p_1, p_2 рекомендуются для трансформаторов на токи 315—500 А, верхние значения соответствуют трансформаторам большей мощности.

2) Сечения обмоточных проводов (для параллельного соединения катушек)

$$q_1 = I_{1ном}/(2J_1); \quad q_2 = I_{2ном}/(2J_2).$$

Для трансформаторов на ток до 500 А класса изоляции Н для ручной дуговой сварки, изготовленных из алюминиевого провода, могут быть рекомендованы следующие значения плотностей тока: $J_1 = 2{,}4 \ldots 2{,}8$ А/мм^2; $J_2 = 2{,}1 \ldots 2{,}3$ А/мм^2. Нижние значения J_1 и J_2 соответствуют трансформаторам большей мощности. Для

первичной обмотки обычно используется провод марки АПСД, для вторичной — голая шина марки АДО.

3) Размеры провода, выбираемые исходя из требуемых сечений провода по таблицам стандартов или технических условий:

$a_{1п}$, $b_{1п}$ — ширина и высота провода первичной обмотки;

$a_{2п}$, $b_{2п}$ — то же для вторичной обмотки;

$a'_{1п}$, $b'_{1п}$, $a'_{2п}$, $b'_{2п}$ — соответствующие размеры провода в изоляции.

Высоту провода следует выбирать возможно меньшей, так как добавочные потери в обмотках от потоков магнитного рассеяния трансформатора пропорциональны четвертой степени высоты провода.

4) Конструктивно-крепежные размеры (рис. 8.9):

изоляционные расстояния обмоток в окне от магнитопровода $\delta_1 = 5 \ldots 10$; верхнее значение соответствует подвижной обмотке;

ширина вентиляционных каналов в обмотках $\delta_2 = 10 \ldots 13$;

ширина прокладки между катушками первичной обмотки $\delta_3 = 1{,}5 \ldots 2{,}0$;

размеры крепежных изоляционных деталей первичной обмотки $\delta_4 = \delta_5 = 10$;

то же для вторичной обмотки $\delta_6 = \delta_7 = 10 \ldots 13$.

5) Размеры катушки первичной обмотки:

ширина катушки

$$m_{1к} = (c_{ок} - 2\delta_1 - \delta_3)/2;$$

число слоев в катушке

$$n_{1сл} = \frac{m_{1к}}{(a'_{1п} + k_и)\, k_у},$$

где $k_и = 0{,}15$ мм — толщина межслоевой изоляции; $k_у = 1{,}1$ — коэффициент, учитывающий неплотность укладки проводников;

число витков в слое

$$w_{сл} = w_{1к}/n_{1сл};$$

высота катушки

$$h_1 = w_{1сл} b'_{1п} k_у.$$

Если трансформатор изготовляется по схеме рис. 8.8, *б*, то между основной частью катушки первичной обмотки и

отключаемой частью необходимо проложить усиленную изоляцию — поставить три прокладки по 0,15 мм.

6) Размеры катушки вторичной обмотки. Вторичная обмотка наматывается «на ребро» голой алюминиевой шиной марки АДО. Выбор размера шины и внутреннего радиуса намотки «на ребро» производится из условия, что относительное удлинение волокон шины по наружному радиусу должно быть не более 30 %, в противном случае могут появиться разрывы шины при намотке.

Высота катушки

$$h_2 = w_{2к} b'_{2п} k_у.$$

7) Высота окна магнитопровода

$$h_{ок} = \delta_4 + h_1 + \delta_5 + \xi_{max} + h_2 + \delta_6 + \delta_7.$$

Величина ξ_{max} определяется в процессе поверочного расчета индуктивного сопротивления трансформатора.

7. Поверочный расчет трансформатора производится по приведенным ранее формулам. Полный поверочный тепловой расчет может быть выполнен по известным методикам расчета силовых трансформаторов.

Трансформаторы с подвижными магнитными шунтами. Трансформаторы с развитым магнитным рассеянием и подвижными магнитными шунтами выполняются на магнитопроводах стержневого типа и имеют дисковые обмотки.

Обмотки трансформатора (рис. 8.10, *а*, *б*) расположены симметрично на двух стержнях магнитопровода *3*. В канале между первичными *1* и вторичными *2* обмотками установлен магнитный шунт *4*. Между шунтом и стержнями магнитопровода имеются воздушные зазоры δ.

Возможны два варианта взаимного расположения первичной и вторичной обмоток относительно шунта, а именно полное или частичное разнесение. При полном разнесении первичные и вторичные обмотки расположены по разные стороны шунта (рис. 8.10, *а*). При частичном разнесении (рис. 8.10, *б*) вторичная обмотка состоит из двух секций — основной *2* с числом витков $w_{2о}$ и дополнительной *5* с числом витков $w_{2д}$, причем дополнительная обмотка размещена в зоне первичной обмотки *1* и имеет с ней хорошую электромагнитную связь. Справа на рис. 8.10, *б* представлена эпюра магнитодвижущих сил такого трансформатора.

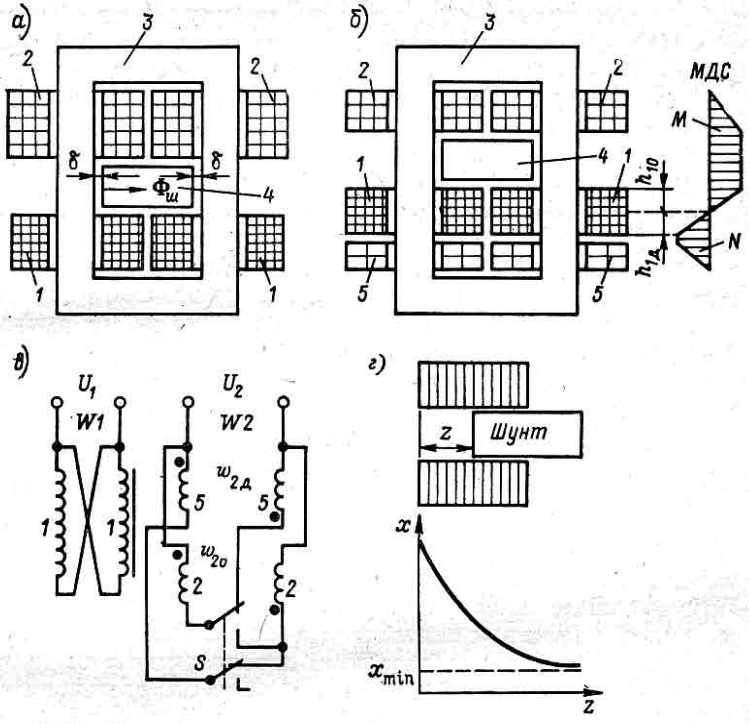


Рис. 8.10. Конструкции трансформаторов с подвижными магнитными шунтами и схемы соединения обмоток

Как показывает опыт, трансформатор с полностью разнесенными обмотками целесообразно выполнять только на небольшие мощности — на токи до 200—250 А. Для дальнейшего увеличения тока приходится снижать числа витков первичных и вторичных обмоток. При этом нарушается оптимальное соотношение расхода обмоточных материалов и стали, трансформатор становится «стальным», его масса растет.

Дополнительные витки вторичной обмотки незначительно увеличивают индуктивное сопротивление трансформатора и позволяют создать оптимальную по массе и пределам регулирования конструкцию.

В трансформаторах с частичным разнесением обмоток для получения двух диапазонов регулирования обычно изменяют степень разнесения обмоток. Полному разнесению обмоток соответствует диапазон малых токов. При

переходе на диапазон больших токов включается обмотка с числом витков $w_{2д}$ и отключается часть обмотки с числом витков $w_{2о}$.

Новая, наиболее рациональная схема соединения обмоток представлена на рис. 8.10, *в*. Диапазону больших токов соответствует параллельное соединение катушек вторичной обмотки. При переходе на диапазон малых токов дополнительные катушки *5* отключаются, а основные катушки *2* включаются последовательно; переход на диапазон малых токов сопровождается увеличением напряжения холостого хода.

При переходе с одного диапазона токов на другой в трансформаторе с шунтом не требуется переключения витков первичной обмотки, что положительно сказывается на надежности трансформатора.

Плавное регулирование тока в трансформаторе осуществляется перемещением магнитного шунта вручную или сервоприводом. При полностью вставленном в окно шунте магнитная проводимость для потока рассеяния и, следовательно, индуктивное сопротивление трансформатора максимальны, сварочный ток при этом минимален. При выдвижении шунта из окна магнитопровода магнитная проводимость уменьшается и сварочный ток растет.

Зависимость индуктивного сопротивления x от положения шунта показана на рис. 8.10, *г*. Скорость снижения x при выдвижении шунта вначале постоянна, а затем уменьшается, стремясь к нулю. При выходе шунта за пределы окна магнитопровода изменение x относительно невелико.

Магнитный шунт при выходе из окна магнитопровода испытывает максимальное осевое электромагнитное усилие, втягивающее шунт в окно магнитопровода и вызывающее его вибрацию. Для снижения вибрации применяются тугие направляющие, по которым перемещается шунт, или шунт снабжается пружинами, отжимающими его к одной стороне магнитопровода или устанавливающими его в окне с некоторым перекосом. Вибрация магнитного шунта значительно уменьшается, если его разделить на две равные части и регулирование тока производить, перемещая части шунта из окна в противоположные стороны. В этом случае осевые усилия, действующие на шунты, направлены навстречу друг другу.

Индуктивное сопротивление трансформатора. Трансформатор с выдвинутым магнитным шунтом почти пол-

ностью аналогичен трансформатору с подвижной обмоткой. Однако наличие выдвинутого магнитного шунта несколько влияет на характер поля рассеяния, в результате чего индуктивное сопротивление такого трансформатора на 20—30 % выше, чем у подобного трансформатора с разнесенными обмотками без шунта.

Минимальное индуктивное сопротивление трансформатора

$$x_{\min} = (1,\ 2 \ldots 1,\ 3)(x_{\text{ок}} + x_{\text{л}} + x_{\xi_1}),$$

где ξ_1 — расстояние между обмотками *1* и *2* (рис. 8.10).

Максимальное индуктивное сопротивление слагается из двух составляющих, соответствующих магнитным потокам рассеяния по воздуху ($x'_{\min}$) и через шунт ($x_{\text{ш}}$).

Составляющая

$$x'_{\min} = x_{\text{ок}} + x_{\text{л}} + x_{\xi_2},$$

где ξ_2 — усредненное расстояние от обмоток до шунта.

Составляющая

$$x_{\text{ш}} = \frac{k_{\text{в}}\omega\mu_0 w_2^2 S_{\text{ш}}}{2\delta},$$

где $k_{\text{в}} = 1{,}1$ — коэффициент, учитывающий «выпучивание» магнитного потока шунта; $S_{\text{ш}}$ — площадь поперечного сечения магнитного шунта, м^2; δ — зазор между шунтом и магнитопроводом, м.

Минимальное индуктивное сопротивление рассеяния $x_{\min}$ трансформатора с частично разнесенными обмотками слагается из двух составляющих $x_{\min\,\text{о}}$ и $x_{\min\,\text{д}}$, обусловленных взаимодействием первичной обмотки с основной и дополнительной вторичными обмотками (группы катушек, создающие МДС M и N — рис. 8.10, *б*).

При определении $x_{\min\,\text{о}}$ в приведенные ранее формулы для трансформатора с подвижной обмоткой следует подставить число витков $w_{2\text{о}}$, высоты катушки основной обмотки $h_{2\text{о}}$ и части первичной обмотки $h_{1\text{о}} = h_1 \frac{w_{2\text{д}}}{w_2}$, а также учесть расстояние между обмотками *1* и *2*.

При определении $x_{\min\,\text{д}}$ учитывается число витков $w_{2\text{д}}$, высота катушек $h_{2\text{д}}$ и $h_{1\text{д}} = h_1 \frac{w_{2\text{д}}}{w_2}$ и зазор между обмотками *1* и *5*.

При расчете индуктивного сопротивления $x_{\text{ш}}$ в приведенную формулу следует подставить $w_{2\text{о}}$.

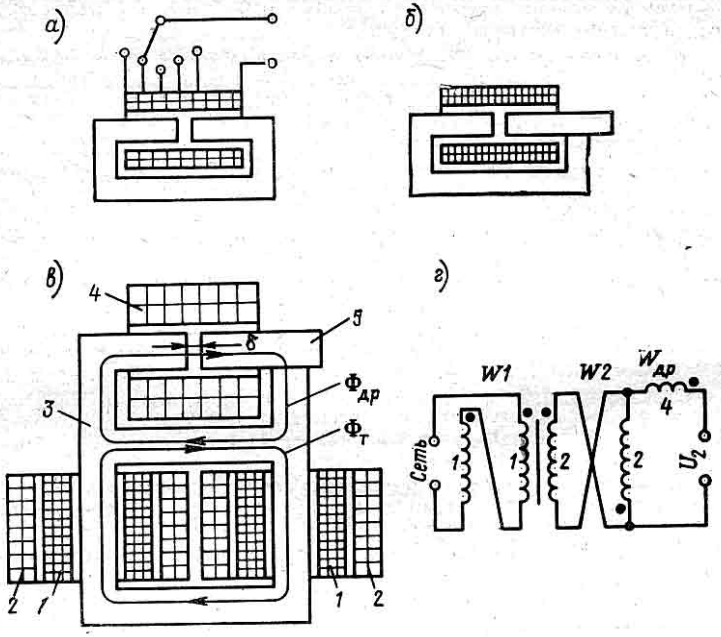


Рис. 8.11. Трансформатор с дросселями с воздушным зазором

Трансформаторы с подвижными шунтами, выполненные по схеме рис. 8.10, *в*, не уступают по массе и энергетическим показателям трансформаторам с подвижными обмотками. Эти трансформаторы не имеют узла низкой надежности — переключателя в первичной цепи. Однако они не нашли у нас широкого распространения из-за несколько большей трудоемкости их изготовления.

Трансформаторы с дросселями с воздушным зазором. Дроссели обычно устанавливаются во вторичных цепях силового трансформатора. Трансформатор, работающий в комплекте с дросселем, является обычным понижающим силовым трансформатором с нормальным рассеянием и имеет жесткую внешнюю характеристику.

Регулирование индуктивного сопротивления дросселя, а следовательно, и сварочного тока принципиально может осуществляться ступенчато — изменением числа витков обмотки (рис. 8.11, *а*) и плавно — изменением воздушного зазора в магнитопроводе дросселя (рис. 8.11, *б*).

Регулирование по первому способу, несмотря на сравнительно более высокую надежность, практического применения не нашло. Это связано с необходимостью в большом числе отводов на обмотке для плавного регулирования и с плохим использованием активных материалов дросселя при данном способе регулирования. В номинальном режиме работы дроссель рассчитан на неполное число витков и уменьшение

тока осуществляется введением дополнительных витков, вызывающих рост расчетной мощности дросселя.

Регулирование по второму способу имело у нас достаточно широкое распространение. Дроссель с регулируемым воздушным зазором выполняется отдельно на собственном магнитопроводе или совместно с трансформатором на общей магнитной системе.

Трансформатор (рис. 8.11, *в*, *г*) содержит первичную обмотку *1*, вторичную обмотку *2*, магнитопровод *3*, обмотку дросселя *4* и подвижный пакет дросселя *5*. Обычно обмотка дросселя ($W_{др}$ на рис. 8.11, *г*) включается встречно со вторичной обмоткой трансформатора *W2*. При нагрузке поток обмотки дросселя $\Phi_{др}$ в среднем ярме направлен встречно потоку $\Phi_т$ трансформатора. Индукция и потери в среднем ярме при таком соединении уменьшаются, появляется возможность несколько снизить его сечение по сравнению с нижним ярмом.

Регулирование тока в трансформаторе производится подвижным пакетом дросселя. С увеличением воздушного зазора δ индуктивное сопротивление трансформатора снижается и сварочный ток растет. В результате действия электромагнитных сил подвижный пакет дросселя подвержен вибрациям, особенно значительным при малом зазоре δ. Вибрации могут вызвать поломки в подвижном механизме, а также нарушение изоляции обмоток.

По массе такие трансформаторы уступают трансформаторам с подвижными обмотками и подвижными шунтами. Выпуск их в настоящее время во всем мире практически прекращен.

В работе [32] приведена методика точного расчета дросселя с зазором.

8.3. ТРАНСФОРМАТОРЫ, РЕГУЛИРУЕМЫЕ ПОДМАГНИЧИВАНИЕМ

В эту группу источников входят трансформаторы с нормальным рассеянием, работающие в комплекте с дросселями насыщения (ДН), и трансформаторы с увеличенным магнитным рассеянием, регулируемые подмагничиванием шунта (ТРПШ).

Эти источники имеют ряд существенных преимуществ перед рассмотренными ранее. Первое преимущество — отсутствие подвижных частей и, как следствие, высокая надежность и долговечность. Второе — сравнительно малая инерционность регулирования и простота дистанционного управления. Третье преимущество, относящееся к ДН, — возможность получения очень широких пределов регулирования тока и прямоугольной формы кривой тока.

Недостатки этих устройств — большой расход активных материалов и невысокие энергетические показатели.

Дроссели насыщения получили за рубежом широкое распространение в универсальных источниках питания переменного и постоянного тока для аргонодуговой сварки,

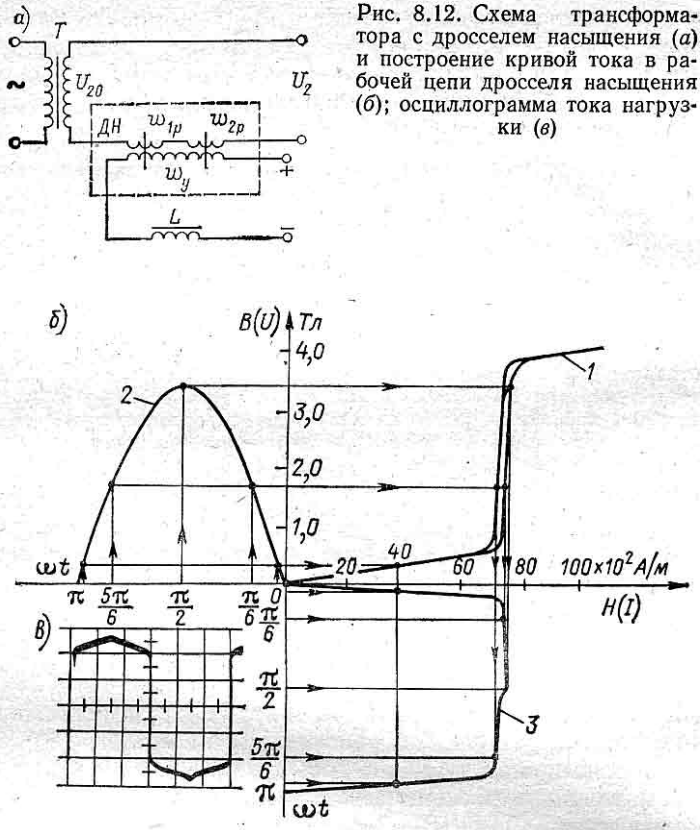


Рис. 8.12. Схема трансформатора с дросселем насыщения (*а*) и построение кривой тока в рабочей цепи дросселя насыщения (*б*); осциллограмма тока нагрузки (*в*)

реже используются для создания источников с прямоугольной формой кривой тока. ТРПШ применяются как у нас, так и за рубежом в качестве источников для аргонодуговой сварки и автоматической сварки под флюсом.

В последнее время источники, регулируемые подмагничиванием, стали вытесняться более современными и экономичными тиристорными системами.

Трансформаторы с дросселями насыщения. Схема трансформатора представлена на рис. 8.12, *а*. Во вторичной цепи трансформатора T с нормальным рассеянием включен дроссель насыщения (ДН). На двух магнитопроводах ДН размещены рабочие обмотки с числами витков $w_{1р}$ и $w_{2р}$; обмотка управления с числом витков $w_у$ охватывает одновременно оба магнитопровода. Рабочие

обмотки включены встречно-последовательно, чтобы ЭДС основной частоты, наводимые в обмотке управления, взаимно компенсировались. Однако при наличии тока управления в обмотке управления наводится ЭДС двойной частоты с амплитудой

$$E_{2\omega m} = U_{20m} \frac{w_y}{w_p},$$

где $w_p = w_{1p} + w_{2p}$.

Различают два режима работы дросселя насыщения: режим свободного и вынужденного намагничивания. При свободном намагничивании сопротивление в цепи управления настолько мало, что не может влиять на значение гармонической составляющей тока в этой цепи, возникающей под действием ЭДС $E_{2\omega m}$. При вынужденном намагничивании гармоническая составляющая тока полностью (или частично) подавлена путем введения в цепь управления дополнительного индуктивного сопротивления (дроссель L на рис. 8.12, *а*). У «идеальных» ДН, выполненных на магнитопроводе с прямоугольной кривой намагничивания, у которого отсутствуют рассеяние обмоток и активные потери, а гармоническая составляющая тока управления полностью подавлена, кривая тока нагрузки имеет прямоугольную форму. В цепи нагрузки «идеального» ДН, работающего в режиме свободного намагничивания, форма кривой тока, напротив, сильно искажена.

В источниках питания с прямоугольной формой кривой тока свойства реальных ДН стараются всемерно приблизить к свойствам «идеального» ДН: применяют тороидальные магнитопроводы из холоднокатаной стали, прошедшей специальную термообработку.

Как будет показано ниже, получение благоприятной для сварки прямоугольной формы кривой тока связано с существенными дополнительными затратами активных материалов на изготовление дросселя L, поэтому такие источники находят ограниченное применение — только для специальных целей.

В более массовых источниках ДН работают в режиме свободного намагничивания. В таких источниках принимают специальные меры для устранения искажений кривой сварочного тока: ДН изготовляют на пластинчатых магнитопроводах из материала со слабо выраженной нелинейностью кривой намагничивания, допускают повы-

шенное воздушное рассеяние обмоток, на пути переменного магнитного потока вводят воздушные зазоры. Все эти меры весьма отрицательно сказываются на регулировочных возможностях ДН, однако позволяют без дополнительных затрат приблизить форму кривой сварочного тока к синусоидальной.

Построение кривой тока (для режима короткого замыкания) в цепи с реальным ДН, работающим в режиме вынужденного намагничивания, приведено на рис. 8.12, *б*. При отсутствии тока управления синусоидальное напряжение U_{20} поровну распределяется между рабочими обмотками обоих магнитопроводов и индукция в них изменяется по синусоидальному закону с амплитудой

$$B_m = \frac{\sqrt{2}\, U_{20}}{2\omega w_{\text{р}} S_{\text{ДН}}},$$

где $S_{\text{ДН}}$ — активное сечение стали магнитопровода ДН.

Если значение индукции выбрано таким образом, что отсутствует режим перевозбуждения [37], ток на выходе ДН очень мал и по форме близок к синусоиде.

Постоянный ток в обмотке управления $I_{\text{у}}$ создает сильное магнитное поле, которое вызывает значительное намагничивание магнитопроводов ДН: одного — в положительном, а другого — в отрицательном направлениях.

Под воздействием рабочего напряжения возникает МДС переменного тока, которая в одном магнитопроводе ДН совпадает с МДС обмотки управления, а во втором — направлена встречно ей. В магнитопроводе, где МДС складываются, магнитная индукция может изменяться весьма незначительно, так как магнитопровод работает на насыщенном участке кривой намагничивания. Во втором магнитопроводе МДС направлены встречно, и индукция в нем может меняться в больших пределах.

Так как магнитопроводы включены последовательно, ток в рабочей цепи под действием приложенного напряжения будет определяться суммарным сопротивлением рабочих обмоток обоих магнитопроводов.

Характеристика намагничивания эквивалентного элемента (кривая *1* на рис. 8.12, *б*) получается путем графического сложения характеристик намагничивания первого и второго магнитопроводов и некоторого линейного элемента, учитывающего индуктивное сопротивление рабочих обмоток ДН. Положение кривой намагничивания эквивалентного элемента в системе координат опреде-

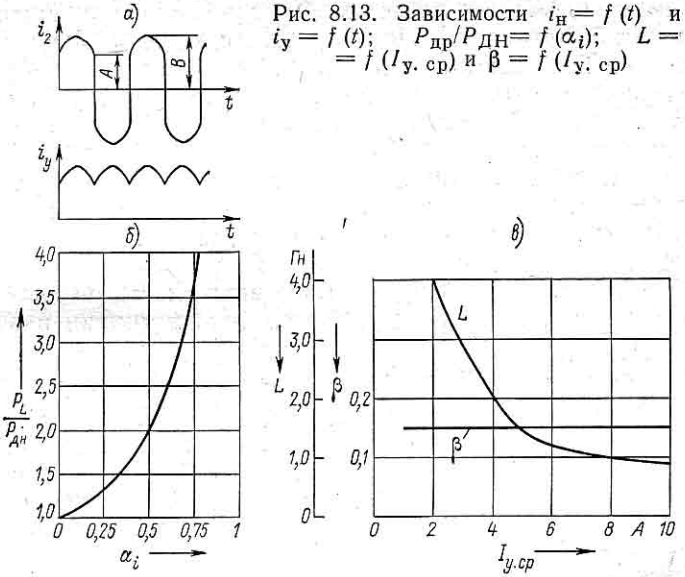


Рис. 8.13. Зависимости $i_н = f(t)$ и $i_у = f(t)$; $P_{др}/P_{ДН} = f(\alpha_i)$; $L = f(I_{у.ср})$ и $\beta = f(I_{у.ср})$

ляется значением МДС обмотки управления. Индукция в эквивалентном элементе изменяется с амплитудой $2B_m$.

Прикладывая к эквивалентному элементу синусоидальное напряжение (кривая *2* на рис. 8.12, *б*), можно графически построить кривую тока *3* в рабочей цепи ДН. Отметим, что кривые тока в оба полупериода полностью симметричны, так как в каждый полупериод магнитные состояния магнитопроводов взаимно меняются. На рис. 8.12, *в* приведена осциллограмма тока нагрузки экспериментального источника ТСГП-200 для режима 50 А, 16 В.

В работе [32] показано, как изменяется форма кривой тока нагрузки в зависимости от степени сглаживания пульсаций тока в цепи управления.

При конечном значении индуктивности сглаживающего дросселя кривая тока нагрузки i_2 (рис. 8.13, *а*) имеет две составляющие. Первая составляющая изменяется во времени по синусоидальному закону, вторая составляющая в течение полупериода остается неизменной. С увеличением индуктивного сопротивления в цепи управления синусоидальная составляющая уменьшается, а постоянная возрастает. Соотношение составляющих тока нагрузки может быть характеризовано коэффициентом $\alpha_i = A/B$ (рис. 8.13, *а*).

На рис. 8.13, *б* представлена зависимость мощности сглаживающего дросселя $P_{\text{др}}$, отнесенной к мощности дросселя насыщения, от коэффициента α_i.

При $\alpha_i = 0$ кривая тока нагрузки имеет форму синусоиды. Чтобы получить такую форму кривой тока, необходимо в цепи управления установить сглаживающий дроссель, мощность которого равна мощности дросселя насыщения. Для получения кривой тока с большим коэффициентом α_i требуется сглаживающий дроссель весьма большой мощности.

Покажем, какие следует применять меры, чтобы сохранить постоянной форму кривой тока нагрузки в процессе регулирования.

В каждый полупериод переменного тока справедливо соотношение

$$i_2 = \left(i_{\text{у}} \frac{w_{\text{у}}}{w_{\text{р}}} \right).$$

Следовательно, форма кривой тока нагрузки однозначно связана с величиной пульсаций в кривой тока управления.

Амплитуда пульсаций тока управления

$$I_{\text{у}m} = E_{2\omega m}/(\omega L_{\text{др}}).$$

Коэффициент пульсаций

$$\beta = \frac{I_{\text{у}m}}{2I_{\text{у. ср}}} = \frac{E_{2\omega m}}{2\omega L_{\text{др}} I_{\text{у. ср}}}.$$

Известно [37], что амплитуда ЭДС двойной частоты не зависит от тока управления, а определяется только падением напряжения на рабочих обмотках ДН. Для режима короткого замыкания

$$E_{2\omega m} = U_{20m} w_{\text{у}}/w_{\text{р}}.$$

Поэтому коэффициент пульсаций β определяется только произведением $L_{\text{др}} I_{\text{у. ср}}$. Для того чтобы сохранить неизменной форму кривой тока нагрузки в процессе регулирования, это произведение должно быть постоянным: $L_{\text{др}} I_{\text{у. ср}} = \text{const}$, т. е. индуктивность дросселя в зависимости от $I_{\text{у. ср}}$ должна изменяться по закону гиперболы (рис. 8.13, *в*).

Если же дроссель выполнить линейным, форма кривой тока в процессе регулирования будет ухудшаться с уменьшением его значения. Наихудшая форма имеет место при

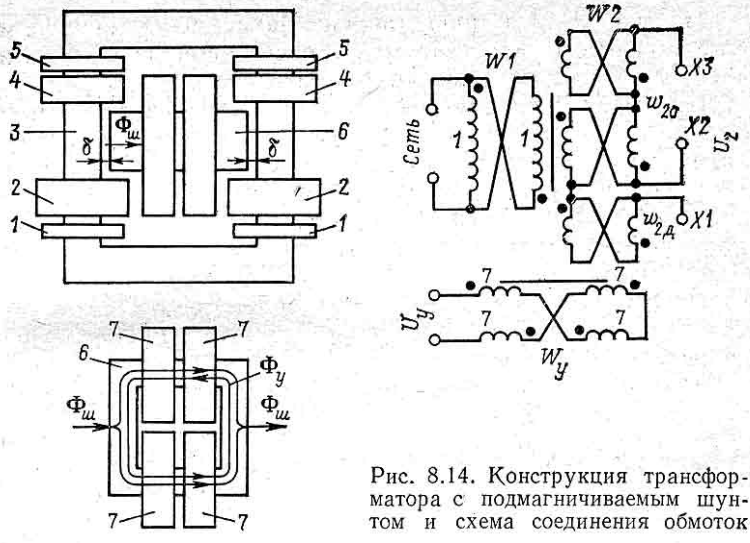


Рис. 8.14. Конструкция трансформатора с подмагничиваемым шунтом и схема соединения обмоток

малых рабочих токах, когда условия существования дугового разряда особенно затруднены.

Наряду с источниками с постоянной формой кривой тока нагрузки во всем диапазоне регулирования могут быть созданы источники, у которых форма кривой тока улучшается с уменьшением его значения. В этом случае обмотку управления следует выполнять секционированной, а регулирование сварочного тока производить ступенями — за счет изменения числа витков обмотки управления и плавно в небольших пределах — путем изменения тока управления. При этом произведение $L_{др}I_{у.ср}$ сохраняется практически постоянным, а относительная величина пульсации в цепи управления изменяется пропорционально числу витков обмотки управления $w_у$. При переходе на малые токи $w_у$ и, следовательно, β уменьшаются и форма кривой тока нагрузки улучшается.

В источнике питания с плавно-ступенчатым регулированием для получения заданной формы кривой тока во всем диапазоне регулирования требуется сглаживающий дроссель существенно меньшей мощности, чем в источнике с плавным регулированием.

Трансформаторы, регулируемые подмагничиванием шунта. На рис. 8.14 показана конструкция и схема соединения обмоток трансформатора, регулируемого подмагни-

чиванием шунта. Эта конструкция получила наиболее широкое распространение в сварочном производстве.

Магнитная система трансформатора состоит из двух замкнутых магнитопроводов, один из которых перпендикулярно вставлен в другой. Внутренний магнитопровод *6* представляет собой магнитный шунт. Силовые обмотки трансформатора расположены симметрично на обоих стержнях внешнего, главного, магнитопровода *3*. Трансформатор выполнен с частичным разнесением силовых обмоток. Вторичная обмотка состоит из основной обмотки с числом витков $w_{2о}$ (катушки *4*, *5*) и дополнительной обмотки с числом витков $w_{2д}$ (катушки *1*), причем основная обмотка расположена по одну сторону шунта, а дополнительная — по другую сторону шунта совместно с первичной обмоткой *W1* (катушки *2*). Катушки первичной и вторичной обмоток на двух стержнях соединены между собой параллельно.

Обмотка управления обычно выполняется секционированной: четыре катушки *7* обмотки управления $W_у$ включены встречно-последовательно относительно ЭДС основной частоты, наводимой в них потоком шунта $Ф_ш$. Поток $Ф_у$, создаваемый постоянным током в обмотках управления, замыкается по шунту.

Между главным магнитопроводом и шунтом имеется воздушный зазор.

Трансформатор имеет два диапазона регулирования за счет переключения витков вторичной обмотки. В диапазоне малых токов нагрузка подключается к зажимам *X2* и *X3*, а в диапазоне больших токов — к зажимам *X1*, *X2*.

При переходе с диапазона малых токов на диапазон больших токов часть витков основной обмотки $w_{2о}$ отключается (катушки *5*) и подключается столько же витков дополнительной обмотки $w_{2д}$ (катушки *1*). Минимальный ток трансформатора (для каждого диапазона) I_{21} определяется максимальным индуктивным сопротивлением трансформатора с шунтом при отсутствии тока управления в его обмотках. Это сопротивление может быть определено по приведенным ранее формулам для трансформатора с подвижным шунтом.

Максимальный ток нагрузки I_{22} зависит от МДС обмоток управления. Необходимая МДС обмоток управления приближенно равна

$$I_у w_у = (I_{22} - I_{21})\, w_{2о}.$$

Разделение полного диапазона регулирования на две ступени позволяет уменьшить МДС обмоток управления и сделать трансформатор более компактным и экономичным.

8.4. ТИРИСТОРНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Тиристорные трансформаторы (ТТ) — сравнительно новая группа источников питания дуги переменного тока, в основу которой положен способ фазового регулирования тока. Основным узлом ТТ является тиристорный фазорегулятор (ФР), работающий в комплекте с силовым трансформатором. Фазорегулятор состоит из двух встречно-параллельно соединенных тиристоров и системы управления фазой их включения.

Способ фазового регулирования переменного тока основан на преобразовании синусоидального тока в знакопеременные импульсы, амплитуда и длительность которых определяются углом (фазой) включения тиристоров. Этот способ, широко используемый в машинах контактной и шлаковой сварки, для дуговой сварки считался неприемлемым, поскольку в паузы между импульсами тока происходит быстрая деионизация дугового промежутка, затрудняющая повторные возбуждения дуги.

В последние годы разработан [4, 17] ряд конструкций ТТ, обеспечивающих достаточно высокую стабильность горения дуги и позволяющих реализовать достоинства фазового регулирования тока: снизить массу и упростить конструкцию силового трансформатора и всего источника в целом, сформировать внешние характеристики требуемого вида, стабилизировать режим сварки при различных возмущениях, управлять постоянной составляющей сварочного тока, обеспечить возможность автоматизации, программирования и модуляции режима сварки, обеспечить снижение выходного напряжения при холостом ходе.

Принципиальные силовые схемы тиристорных трансформаторов. Силовые схемы ТТ могут быть подразделены по двум основным признакам: способу обеспечения непрерывности процесса сварки и месту установки тиристорного фазорегулятора — в первичной или вторичной цепи.

По первому признаку ТТ делятся на две группы.

В трансформаторах одной группы сварочный ток i_2 (рис. 8.15, *а*) прерывистый. Длительность протекания

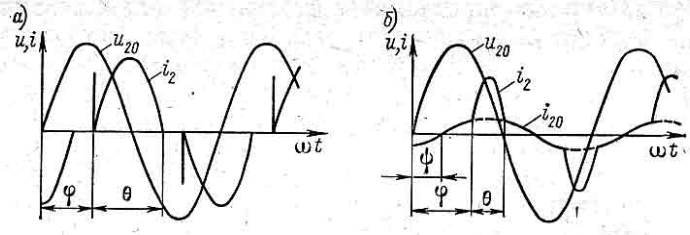


Рис. 8.15. Линейные диаграммы напряжения и токов трансформаторов с импульсной стабилизацией (*а*) и цепью подпитки (*б*)

тока θ определяется углом зажигания силовых тиристоров φ, который здесь является также углом сдвига между током i_2 и напряжением холостого хода трансформатора U_{20}. Для надежного повторного возбуждения применена импульсная стабилизация горения дуги. В момент φ окончания бестоковой паузы на дугу накладывается стабилизирующий импульс тока. Тиристорный фазорегулятор совмещает функции управления током и коммутирующего элемента импульсного стабилизатора горения дуги.

В трансформаторах другой группы стабильность процесса сварки обеспечена непрерывностью сварочного тока. Для заполнения бестоковых пауз в интервалы непроводимости тиристоров использована специальная цепь, называемая цепью подпитки дуги, по которой проходит минимально необходимый для устойчивого процесса сварки ток (ток подпитки i_{20}). Сдвиг между током i_{20} и напряжением U_{20} (рис. 8.15, *б*) здесь определяется углом ψ, зависящим от соотношения напряжений дуги и цепи подпитки:

$$\cos\psi = \pi U_д/(2U'_{20m}),$$

где U'_{20m} — амплитудное значение напряжения цепи подпитки.

В промышленных сварочных установках наибольшее распространение получили ТТ с прерывистым регулированием тока и импульсной стабилизацией, так как применение цепи подпитки связано с дополнительным расходом активных материалов, с применением дополнительного коммутатора в цепи подпитки для снятия напряжения холостого хода, а относительно низкая скорость нарастания тока подпитки при смене полярности обусловливает невысокие сварочные качества источников.

Размещение тиристорного фазорегулятора в первичной или вторичной (сварочной) цепи трансформатора во многом определяет конструкцию ТТ. Во всех случаях, когда не требуется управления постоянной составляющей сварочного тока, предпочтительно включать тиристоры в сравнительно слаботочную цепь первичной обмотки трансформатора. Кроме уменьшения габаритов регулятора и потерь в тиристорах, такое решение позволяет снизить или исключить потери холостого хода трансформатора, обеспечивает оперативные отключения его от питающей сети. Однако при включении тиристоров в первичную цепь трансформатора невозможно регулировать (компенсировать) постоянную составляющую сварочного тока, в трансформаторах с цепью подпитки уменьшается диапазон регулирования сварочного тока, повышаются требования к симметрии импульсов управления тиристорами, к надежности и электрической прочности цепей управления.

Трансформаторы с цепью подпитки. По данным многочисленных экспериментов значение тока подпитки, достаточное для стабильного горения дуги, составляет: 10—15 А — для аргонодуговой сварки неплавящимся электродом алюминиевых сплавов при наличии импульсного стабилизатора дуги и напряжении холостого хода источника питания около 70 В; 10—15 А — для ручной дуговой сварки обмазанными электродами; 20—30 А — для автоматической сварки под флюсом.

Поскольку при смене полярности электродов ток дуги равен току цепи подпитки, очевидно, что параметры последней целиком определяют надежность повторных возбуждений дуги. Малое значение тока подпитки позволяет использовать для повышения стабильности горения дуги методы, традиционно считающиеся невыгодными по энергетическим или массо-габаритным характеристикам: увеличение напряжения холостого хода источника, последовательный резонанс напряжений, формирование прямоугольной волны тока подпитки и т. п.

На рис. 8.16, *а*, *б* представлены упрощенные схемы ТТ с цепью подпитки и тиристорами в цепи вторичной обмотки трансформатора. В схеме рис. 8.16, *а* тиристоры шунтированы дросселем, реактивное сопротивление которого ωL_2 на порядок выше сопротивления рассеяния ωL_1 силового трансформатора *Т1*.

Схемы ТТ, приведенные на рис. 8.16, *б*, *в*, позволяют повысить напряжение холостого хода источника без за-

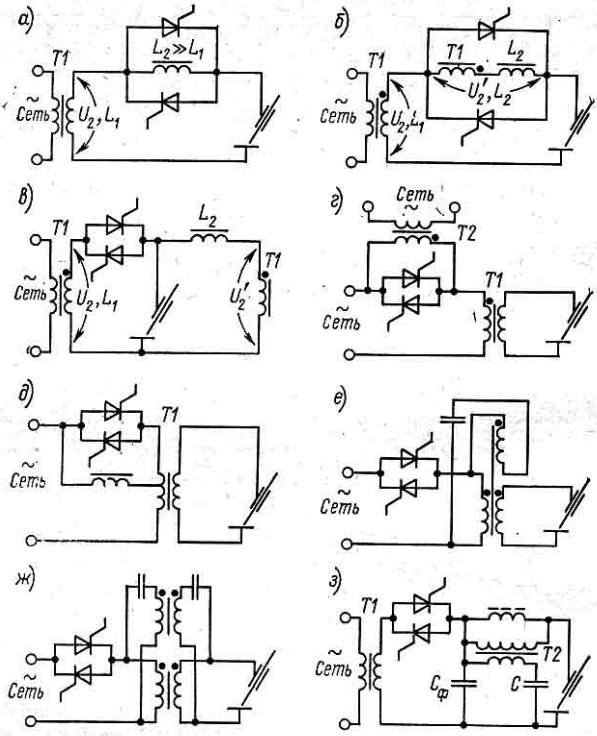


Рис. 8.16. Схемы трансформаторов с цепью подпитки (*а*, *б*, *в*, *г*, *д*) и импульсной стабилизацией (*е*, *ж*, *з*)

метного увеличения его установленной мощности. В цепь подпитки введена дополнительная обмотка силового трансформатора *Т1*. В схеме рис. 8.16, *б* дополнительная обмотка включена последовательно и согласно с основной вторичной обмоткой *Т1*. В схеме рис. 8.16, *в* дополнительная обмотка и дроссель подпитки включены параллельно нагрузке источника. Напряжение параллельно включенной цепи подпитки U'_{20} выше напряжения U_{20}, что исключает возможность включения тиристоров на холостом ходу; во время сварки основная и подпиточная цепи развязаны дуговым падением напряжения.

Дополнительная обмотка и дроссель в схемах рис. 8.16, *б*, *в* могут быть заменены отдельным трансформатором с напряжением холостого хода U'_{20} и требуемым реактивным сопротивлением или обмоткой силового транс-

форматора, имеющей слабую магнитную связь с первичной обмоткой (например, намотанной на дальнее ярмо).

На рис. 8.16, *г*, *д* представлены схемы ТТ с цепью подпитки и тиристорным фазорегулятором в цепи первичной обмотки силового трансформатора. Непосредственное шунтирование тиристоров дросселем (или резистором в трансформаторе малой мощности) снижает напряжение первичной обмотки сварочного трансформатора в интервалы непроводимости тиристоров, что отрицательно влияет на устойчивость горения дуги. Для устранения этого явления может быть использован [5] вспомогательный трансформатор *Т2* (рис. 8.16, *г*) или автотрансформаторная схема с дросселем (рис. 8.16, *д*).

Трансформаторы с прерывистым питанием дуги. На рис. 8.16, *е*, *ж*, *з* приведены схемы ТТ, в которых цепь подпитки исключена и режим горения дуги прерывистый [19]. В ТТ по схеме рис. 8.16, *е* параллельно первичной обмотке силового трансформатора включена цепь, состоящая из конденсатора и дополнительной импульсной обмотки трансформатора, причем дополнительная обмотка расположена в зоне вторичной обмотки силового трансформатора, например намотана поверх нее, чтобы обеспечить достаточную магнитную связь между этими двумя обмотками. При включении любого из тиристоров конденсатор заряжается до текущего значения сетевого напряжения. Зарядный ток конденсатора проходит по дополнительной обмотке, трансформируется во вторичную цепь силового трансформатора и вызывает в дуговом промежутке импульс напряжения, достаточный для повторного возбуждения дуги. По окончании периода проводимости тиристора дуга гаснет, конденсатор разряжается на первичную обмотку силового трансформатора.

В следующий полупериод сетевого напряжения включается второй тиристор фазорегулятора, конденсатор заряжается в обратном направлении, его зарядный ток вызывает стабилизирующий импульс в межэлектродном промежутке и повторное возбуждение дуги.

Параметры стабилизирующего импульса определяются подбором соотношения витков импульсной и вторичной обмоток и емкостью конденсатора. Амплитуда импульса зависит от фазы включения тиристоров, однако, незначительно, поскольку в реальных ТТ с кратностью регулирования сварочного тока около двух фаза включения тиристоров изменяется в пределах 60—120°, что соответ-

ствует колебаниям амплитуды импульса приблизительно на 14 % от максимального значения. В тех же пределах колеблется относительно максимального значения и скорость нарастания сварочного тока при смене полярности:

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_{20m} \sin \varphi - U_д}{L_{св}},$$

где U_{20m} — амплитуда напряжения холостого хода вторичной обмотки сварочного трансформатора; $L_{св}$ — индуктивность сварочного контура.

Таким образом, скорость нарастания тока при фазовом регулировании без цепи подпитки в отличие от амплитудного регулирования практически не убывает при снижении тока.

В тех случаях, когда выполнение дополнительной импульсной обмотки почему-либо нежелательно, может быть использован отдельный импульсный трансформатор (рис. 8.16, *ж*), вторичная обмотка которого включена через разделительный конденсатор параллельно вторичной обмотке сварочного трансформатора.

Экспериментально установлено, что оптимальный коэффициент трансформации цепи стабилизирующего импульса равен единице; емкость конденсатора в трансформаторах для автоматической сварки под флюсом на токи 1000 и 2000 А, выполненных по схеме рис. 8.16, *е*, составляет 10 мкФ, а в трансформаторах для ручной сварки на токи 315—500 А может быть снижена до 2 мкФ. В схеме рис. 8.16, *ж* для получения тех же параметров импульса емкость конденсатора должна быть удвоена. Длительность стабилизирующего импульса τ в зависимости от емкости конденсатора и режима сварки изменяется в пределах 20—100 мс.

Число витков w и сечение S (в квадратных метрах) магнитопровода импульсного трансформатора можно приближенно определить по формуле

$$wS = \sqrt{2}\, U_1 \tau / (4B_m),$$

где U_1 — напряжение сети, В; τ — длительность импульса, с; $B_m = 1{,}5$ Тл.

Для подавления высокочастотных колебаний в цепь импульсной стабилизации необходимо включить резистор с сопротивлением 1—2 Ом.

На рис. 8.17 представлена осциллограмма стабилизирующего импульса трансформатора ТДФЖ-1002, выполненного по схеме рис. 8.16, *е*.

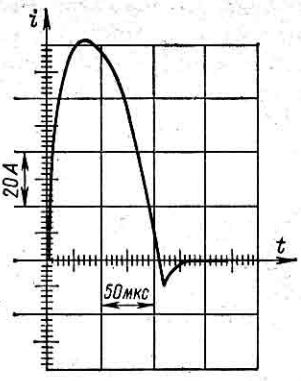


Рис. 8.17. Осциллограмма стабилизирующего импульса трансформатора ТДФЖ-1002

Принцип импульсной стабилизации дуги прерывистого переменного тока может быть реализован и при установке тиристорного фазорегулятора во вторичной цепи сварочного трансформатора. На рис. 8.16, *з* дана схема ТТ с устройством генерации высоковольтных импульсов, обеспечивающих первоначальное зажигание и повторное возбуждение дуги. В момент включения тиристора зарядный ток конденсатора *С* наводит во вторичной обмотке высоковольтного трансформатора *Т2* импульс высокого напряжения, достаточный для пробоя межэлектродного промежутка. Конденсатор $C_ф$ защищает источник питания от перенапряжений.

На рис. 8.18 приведены внешние характеристики тиристорных трансформаторов с цепью подпитки (*а*) и без нее (*б*) для углов зажигания φ от 0 до 120°. Кривая *1* является внешней характеристикой цепи подпитки.

Расчетные соотношения для токов, напряжений и мощности дуги при фазовом регулировании. Приведенные ниже расчетные соотношения позволяют произвести электрические расчеты силового трансформатора и тиристоров фазорегулятора и оценить технологические возможно-

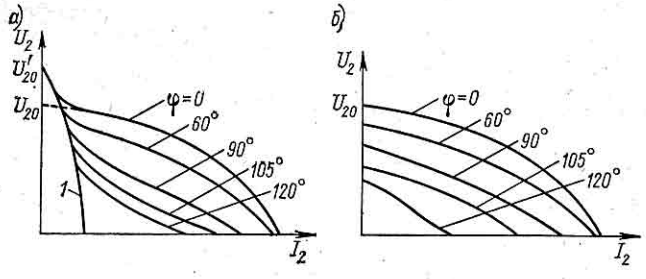


Рис. 8.18. Внешние характеристики трансформаторов с цепью подпитки (*а*) и импульсной стабилизацией (*б*)

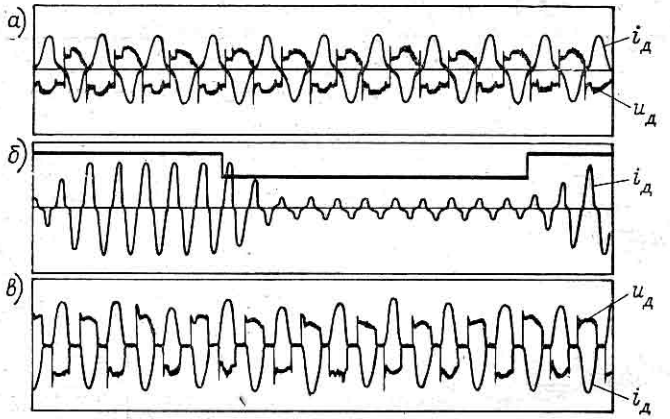


Рис. 8.19. Осциллограммы сварочного тока трансформатора с цепью подпитки (*а*, *б*) и импульсной стабилизацией (*в*) в режимах непрерывного (*а*, *в*) и импульсного тока (*б*), снятые при сварке алюминия вольфрамовым электродом (*а*, *б*) и стали под флюсом (*в*)

сти ТТ применительно к конкретным видам сварки. Вывод расчетных соотношений произведен сначала для режима прерывистых сварочных токов. Анализ осциллограмм сварочного тока для этого режима работы ТТ (рис. 8.19, *в*) свидетельствует о практической синусоидальности импульсов сварочного тока. Тогда для среднего* и действующего значений сварочного тока с учетом его прерывистого характера справедливы соотношения [8]:

$$I_{2ср} = \frac{2\theta}{\pi^2} I_{2m}; \quad I_2 = \sqrt{\frac{\theta}{2\pi}} I_{2m},$$

где I_{2m} — амплитудное значение импульса тока.

Коэффициент π/θ характеризует скважность импульсов сварочного тока. Введя коэффициент $\alpha = \sqrt{\pi/\theta}$, получим

$$I_{2ср} = \frac{2}{\pi\alpha^2} I_{2m}; \quad I_2 = \frac{1}{\sqrt{2}\alpha} I_{2m}; \quad k_ф = 1{,}11\alpha,$$

где $k_ф$ — коэффициент формы тока.

Для практических расчетов целесообразно выразить все расчетные параметры через действующие значения напряжения и тока дуги, выраженные в относительных

* За среднее значение тока принята сумма абсолютных значений токов полупериодов.

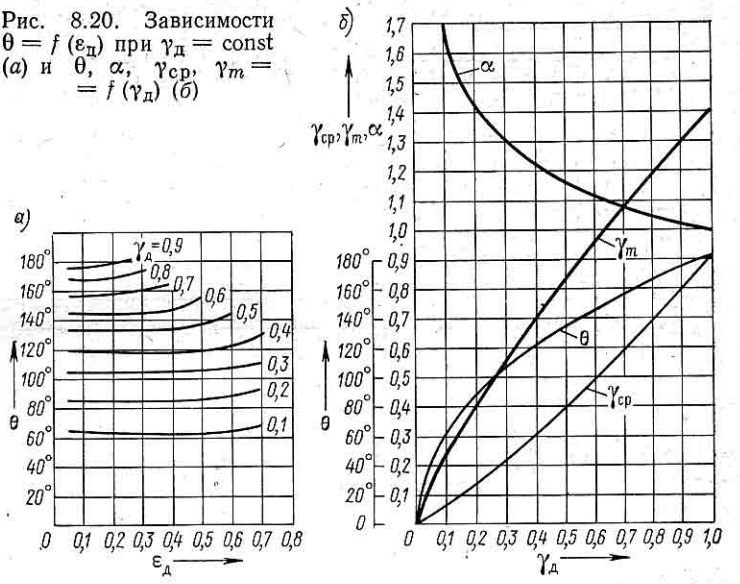


Рис. 8.20. Зависимости $\theta = f(\varepsilon_д)$ при $\gamma_д = \text{const}$ (*а*) и θ, α, $\gamma_{ср}$, $\gamma_m = f(\gamma_д)$ (*б*)

единицах. За базовые величины приняты действующие значения вторичного напряжения холостого хода трансформатора и вторичного тока при коротком замыкании:

$$U_б = U_{20}; \quad I_б = I_{2\,к.з} = U_{20}/x_2,$$

где x_2 — приведенное ко вторичной цепи индуктивное сопротивление трансформатора.

Относительные значения напряжения и тока дуги:

$$\varepsilon_д = U_д/U_{20}; \quad \gamma_д = I_д/I_{2\,к.з} = I_д x_2/U_{20}.$$

Расчеты, проведенные на ЭВМ, и эксперименты показали, что при поддержании постоянства действующего значения тока $I_2 = \text{const}$ длительность его протекания, амплитуда и коэффициент формы остаются практически постоянными при изменении напряжения дуги $U_д$ в широких пределах. На рис. 8.20, *а* приведены расчетные зависимости θ от $\varepsilon_д$ при различных значениях $\gamma_д$, показывающие постоянство угла проводимости θ. Это обстоятельство позволяет построить кривые изменения основных параметров ТТ в режиме прерывистого тока (α, θ, $\gamma_{ср} = I_{ср}/I_б$, $\gamma_m = I_{2m}/I_б$) в функции $\gamma_д$ без учета значения напряжения $\varepsilon_д$ (рис. 8.20, *б*). Пользуясь зависи-

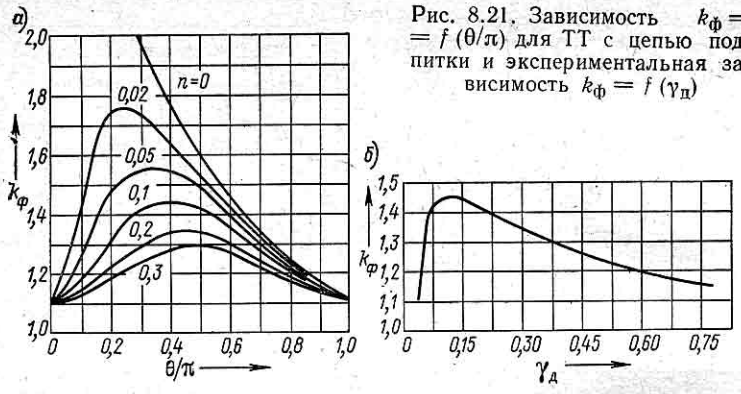


Рис. 8.21. Зависимость $k_ф = f(\theta/\pi)$ для ТТ с цепью подпитки и экспериментальная зависимость $k_ф = f(\gamma_д)$

мостью $\alpha = f(\gamma_д)$, легко по действующему напряжению дуги определить его амплитуду $E_д = \alpha U_д$, которая предполагается постоянной в течение всего времени горения дуги.

Ниже даны примеры использования приведенных соотношений.

Пример 8-1. Тиристорный трансформатор для ручной дуговой сварки на номинальный ток 315 А имеет два диапазона регулирования с токами короткого замыкания $I_{2к.з} = 480$ А и $I_{2к.з} = 240$ А. Сварка производится на токе $I_д = 120$ А. Определить амплитуду и длительность импульсов тока при работе в первом и втором диапазонах тока.

Р е ш е н и е. По кривой на рис. 8.20, *б* для $\gamma_д = 0{,}25$ находим $\theta = 95°$; $I_{2m} = 0{,}5\ I_{2к.з} = 240$ А. Для второго диапазона: $\gamma_д = 0{,}5$; $\theta = 133°$; $I_{2m} = 0{,}85\ I_{2к.з} = 204$ А.

Пример 8-2. Трансформатор ТДФЖ-2002 используется для автоматической сварки в режиме $I_д = 675$ А; $U_д = 32$ В. Оператор ошибочно выбрал диапазон больших токов ($I_{к.з} = 4500$ А). Определить амплитуду напряжения дуги $E_д$.

Р е ш е н и е. По кривой на рис. 8.20, *б* для $\gamma_д = 675/4500 = 0{,}15$ находим $\alpha = 1{,}54$, тогда $E_д = 49$ В.

При использовании диапазона малых токов с $I_{к.з} = 1800$ А дуга будет значительно короче: $E_д = 40$ В.

В ТТ с цепью подпитки ток дуги практически синусоидален при полностью открытых и закрытых тиристорах. В промежуточных режимах коэффициент формы тока $k_ф$ зависит как от относительной продолжительности включения тиристоров θ/π, так и от соотношения токов короткого замыкания подпиточной и основной цепей $n = I'_{к.з}/I_{к.з}$.

Для определения $k_ф$ для ТТ с цепью подпитки получена эмпирическая формула

$$k_ф = 1{,}11 \frac{n + (\theta/\pi)^2}{n + (\theta/\pi)^{5/2}}.$$

Зависимость коэффициента формы тока дуги для ТТ с цепью подпитки от относительной продолжительности включения тиристоров $k_ф = f(\theta/\pi)$ для ряда значений n приведена на рис. 8.21, *а*. На рис. 8.21, *б* изображена экспериментальная зависимость $k_ф = f(\gamma_д)$ тиристорного трансформатора, выполненного по схеме рис. 8.16, *в* с соотношением токов короткого замыкания подпиточной и основной цепей $n = 0{,}037$.

Мощность дуги. Активная мощность дуги переменного тока зависит от амплитуды напряжения дуги и среднего тока:

$$P = \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} i_д(t)\,U_д(t)\,dt = E_д \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} i_д(t)\,dt = E_д I_{ср}.$$

При поддержании постоянства длины дуги ($E_д = \text{const}$) и действующего значения тока мощность дуги с ростом коэффициента формы тока падает:

$$P = E_д I_д / k_ф.$$

При поддержании постоянства действующих значений напряжения дуги и тока мощность дуги не зависит от изменения коэффициента формы тока:

$$P = \alpha U_д I_д k_ф = 0{,}9 U_д I_д,$$

поскольку снижение среднего значения тока компенсируется ростом амплитуды напряжения дуги.

Для дуги с подпиткой (особенно при сварке неплавящимся электродом) действующее значение напряжения дуги практически не зависит от коэффициента формы тока:

$$U_д \approx E_д,$$

соответственно

$$P = U_д I_д / k_ф.$$

Коэффициент мощности тиристорного трансформатора убывает пропорционально росту коэффициента формы

тока в тех случаях, когда поддерживается постоянство длины дуги:

$$\cos\varphi = \frac{P}{U_{20} I_д} = \frac{E}{U_{20} k_ф}$$

(без учета активных потерь в источнике питания).

При поддержании постоянства действующего значения напряжения дуги, например при автоматической сварке под флюсом, коэффициент мощности трансформатора при фазовом и амплитудном регулировании тока выражается одинаково:

$$\cos\varphi = 0{,}9 \frac{U_д}{U_{20}}.$$

Технологические особенности ТТ. Технологические особенности ТТ изучены недостаточно. Есть сведения [22, 42], что повышение плотности тока в электроде при сварке от ТТ, его резкое нарастание способствуют мелкокапельному переносу металла, при этом уменьшается выгорание примесей и перегрев изделия. Исследование микроструктуры и механических свойств швов показало, что при сварке знакопеременными импульсами в 1,5—2 раза сокращается зона термического влияния, уменьшается зернистость, повышается прочность и пластичность шва. Однако рост коэффициента формы сварочного тока при увеличении глубины регулирования неблагоприятно отражается на стойкости обмазки штучного электрода и износостойкости вольфрамового электрода: при дуге равной мощности при повышенном $k_ф$ требуется электрод большего диаметра.

При автоматической сварке под флюсом в стандартных режимах из-за повышенной длины дуги появляется тенденция к порообразованию в швах, что вынуждает выполнять трансформаторы с разбивкой полного диапазона регулирования тока на ступени, рекомендовать сварку на пониженных на 10—15 % значениях действующего напряжения дуги. Установлено, что сварка плавящимся электродом дает удовлетворительные результаты при коэффициенте формы тока, не превышающем 1,4.

В ТТ с прерывистым регулированием для того, чтобы выполнялось условие $k_ф \leqslant 1{,}4$, диапазон плавного регулирования не должен быть более двух. С учетом того, что максимальный ток дуги равен примерно $0{,}7 I_{2к.з}$ ($\gamma_{д\,max} = 0{,}7$), пределы регулирования тока дуги составляют $\gamma_д = 0{,}35 \ldots 0{,}7$. В ТТ с цепью подпитки диапазон плав-

ного регулирования значительно шире. Так, цепь подпитки с $n = 0{,}1$ позволяет плавно регулировать ток $\gamma_д$ от 0,1 до 0,7 с коэффициентом формы не выше 1,45 (рис. 8.21, *а*).

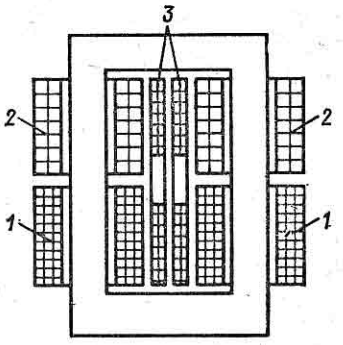


Рис. 8.22. Силовой трансформатор с реакторной обмоткой

Силовой трансформатор. Существенное достоинство ТТ — простота и надежность силового трансформатора. Отсутствие подвижных частей и стальных шунтов, требующих высокого качества сборки и подверженных вибрации, позволило сделать этот важнейший узел источника питания простым в изготовлении и долговечным в эксплуатации.

В ТТ получила распространение традиционная двухстержневая конструкция трансформатора с фиксированным повышенным магнитным рассеянием (рис. 8.22). Первичная *1* и вторичная *2* обмотки состоят из двух катушек. На каждом стержне катушки и изоляционные колодки образуют многослойный набор, зажатый между нижними швеллерами и шпильками с опорой в верхних швеллерах. Расстояние между первичной и вторичной обмотками составляет 2—4 см.

Индуктивное сопротивление x_2 такого трансформатора может быть рассчитано по приведенным ранее формулам. Для приближенных расчетов может быть рекомендована эмпирическая формула

$$x = 1{,}8 \cdot 10^{-6} w_2^2 h_{ок} (1 + 1{,}45 b / c_{ок}),$$

где $h_{ок}$, $c_{ок}$ — высота и ширина окна, см; b — толщина набора, см.

Для создания диапазона малых токов применена воздушная дисковая обмотка *3* (рис. 8.22), установленная в окне трансформатора в плоскости, параллельной его стержням. Реакторная обмотка включается последовательно и согласно с первичной или последовательно и встречно со вторичной обмоткой трансформатора. Обратное включение реакторной обмотки, например согласно со вторичной обмоткой трансформатора, вызывает увеличение тока короткого замыкания.

Если высота реакторной обмотки в окне трансформатора незначительно отличается от суммарной высоты катушек силовых обмоток, то число ее витков для рассматриваемой конструкции может быть определено по формуле

$$I'_{2\text{к. з}} = \frac{I_{2\text{к. з}}}{0{,}5n^2 + 0{,}75n + 1},$$

где $I'_{2\text{ к. з}}$, $I_{2\text{ к. з}}$ — токи короткого замыкания трансформатора с реакторной обмоткой и без нее; n — отношение чисел витков реакторной и первичной или вторичной силовой обмотки.

Режимы работы тиристоров в фазорегуляторе. Основным условием многолетней безаварийной работы ТТ является правильный выбор силовых тиристоров. При этом должны быть учтены тепловые нагрузки тиристоров в номинальном и максимальном режимах работы, технологические и аварийные перегрузки, циклические нагрузки, скорости нарастания напряжения и тока, особенности управления тиристорами. Во всех режимах работы тиристорного фазорегулятора, кроме аварийного, температура тиристора* не должна превышать максимального значения $T_{\max} = 125$ °С. Величина T определяется по формуле

$$T = PR_{\text{т}} + T_{\text{о}},$$

где P — мощность потерь в тиристоре, Вт; $R_{\text{т}}$ — тепловое сопротивление, °С/Вт; $T_{\text{о}}$ — температура окружающей среды, °С.

Величина $R_{\text{т}}$ зависит от конструкции тиристора и охладителя (радиатора), от способа и интенсивности охлаждения и от времени, прошедшего с момента начала нагрева структуры. Тепловое сопротивление уменьшается при увеличении скорости обдува охладителя или увеличении расхода воды в тиристорах с водяным охлаждением. Минимальное в начале нагрева тепловое сопротивление становится максимальным (установившимся): $R_{\text{т}} = R_{\text{уст}}$, когда температура охладителя устанавливается на определенном уровне нагрева. Графики зависимости величины $R_{\text{т}}$ от условий охлаждения и времени нагрева приводятся для типовых конструкций охладителей в справочной литературе и каталогах тиристоров.

---

* Здесь и далее под температурой тиристора понимается температура его структуры.

Мощность потерь в одном тиристоре фазорегулятора можно определить из соотношения

$$P = 0{,}5\,(U_0 I_{ср} + R_д I^2),$$

где U_0, $R_д$ — пороговое напряжение и динамическое сопротивление тиристора, значения которых приведены в каталоге; I — заданный действующий ток фазорегулятора; $I_{ср}$ — суммарный средний ток, который может быть определен по кривой на рис. 8.20, *б*.

Для расчета нагрева тиристоров трансформатора, работающего с ПВ = 100 %, пользуются установившимся значением теплового сопротивления.

При циклической нагрузке определяют максимальную и минимальную температуру тиристора:

$$T' = PR'_{т.ц} + T_о; \quad T'' = PR''_{т.ц} + T_о,$$

где $R'_{т.ц}$, $R''_{т.ц}$ — тепловые сопротивления в момент окончания импульса нагрузки и в момент окончания паузы.

Для ТТ с водяным охлаждением и принудительным воздушным охлаждением тиристоров при скорости охлаждающего воздуха не менее 6 м/с, работающих с ПВ = = 60 % при 10-минутном цикле, можно считать $R'_{т.ц} = R_{уст}$ и $R''_{т.ц} = 0$, т. е. за 6 мин нагрузки тиристор нагревается до установившейся температуры, а за 4 мин паузы остывает до температуры окружающего воздуха (охлаждающей воды).

Для ТТ с естественным воздушным охлаждением тепловое сопротивление в режиме циклической нагрузки можно определить по формулам:

$$R_{т.ц} = kR_{уст} + (1 - k)\,R_{ц+и} - R_ц + R_и;$$

$$R_{т.ц} = kR_{уст} + (1 - k)\,R_ц - R_и,$$

где k = ПВ/100; $R_ц$ — величина $R_т$, соответствующая длительности цикла сварки $t_ц$; $R_и$ — величина $R_т$, соответствующая длительности импульса нагрузки $t_и$; $R_{ц+и}$ — величина $R_т$, соответствующая суммарной длительности импульса нагрузки и цикла $t_{ц+и}$.

Так, для ПВ = 60 % будет $k = 0{,}6$; $t_ц = 600$ с (при обычно принятом 10-минутном цикле); $t_и = 360$ с; $t_{ц+и} = = 960$ с.

Изменение температуры при циклической нагрузке $\Delta T = T' - T'' = P\,(R'_{т.ц} - R''_{т.ц})$ определяет допустимое число циклов и, следовательно, срок службы тиристора.

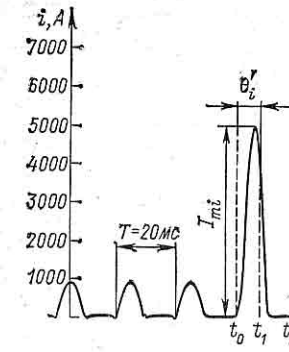


Рис. 8.23. Осциллограмма тока тиристора в аварийном режиме (трансформатор ТДФЖ-1002)

В процессе сварки тиристоры испытывают кратковременные технологические перегрузки. Например, при коротком замыкании сварочной цепи в момент возбуждения дуги ток фазорегулятора увеличивается в 1,3—2 раза по сравнению с номинальным. Температура тиристора в момент окончания технологической перегрузки

$$T_{т.п} = T_0 + P(R_{уст} - R_{т.п}) + P_{к.з}R_{т.п},$$

где P — мощность потерь в режиме, предшествовавшем перегрузке; $P_{к.з}$ — мощность потерь в режиме короткого замыкания нагрузки; $R_{т.п}$ — тепловое сопротивление, соответствующее длительности технологической перегрузки.

Наибольшему нагреву тиристоры подвергаются в аварийном режиме. Для ТТ с фазорегулятором в цепи первичной обмотки силового трансформатора аварийный режим наступает при потере управления одним из тиристоров. При этом происходит насыщение магнитопровода трансформатора постоянным током тиристора, сохранившего управление, и резкое нарастание этого тока. На рис. 8.23 приведена осциллограмма тока тиристора в аварийном режиме работы трансформатора ТДФЖ-2002 — тока тиристора от момента отключения цепи управления вторым тиристором фазорегулятора до срабатывания электромагнитного расцепителя защитного автоматического выключателя. Уставка по току срабатывания автоматического выключателя 4000 А.

Аварийный режим может возникнуть и во время переходных процессов в трансформаторе, например при возбуждении дуги, если длительность импульсов управления тиристорами недостаточна: при длительности интервала проводимости одного тиристора $\theta > \pi$ второй тиристор не может включиться до окончания полуволны тока первого тиристора (полуволновой эффект). Расчет температуры тиристора в аварийном режиме требует наличия

осциллограмм аварийного тока и может быть выполнен по следующей методике:

последовательно с одним из тиристоров включают шунт, сигнал с которого подают на шлейф осциллографа;

включают трансформатор на заданный режим работы;

спустя 0,1—0,5 с после начала записи тока тиристора снимают сигнал управления со второго тиристора; запись продолжают до момента срабатывания автоматического выключателя в первичной цепи ТТ;

по осциллограмме определяют амплитуду I_m и длительность θ импульсов аварийного тока;

пользуясь известными формулами, находят среднее и действующее значения тока каждого импульса:

$$I_{\text{ср}\,i} = \frac{I_{mi}}{1{,}57}\frac{\theta}{T}; \quad I_i = \frac{I_{mi}}{\sqrt{2}}\sqrt{\frac{\theta}{T}},$$

где $T = 20$ мс — период следования импульсов.

Затем определяют среднюю и максимальную мощность каждого импульса:

$$P_{\text{ср}\,i} = U_0 I_{\text{ср}\,i} + R_д I_i^2; \quad P_{\max i} = U_0 I_{mi} + R_д I_{mi}^2.$$

Для расчета максимальной температуры тиристора реальный импульс тока заменяют прямоугольным импульсом (рис. 8.23). Этот эквивалентный импульс имеет такие же значения максимальной и средней мощности, как и реальный импульс, и длительность θ_i', равную $TP_{\text{ср}\,i}/P_{\max i}$, чтобы сохранить прежнее соотношение между максимальной и средней мощностью. Такой способ пересчета в прямоугольные импульсы, как известно, соответствует худшему случаю приближения, так как прямоугольный импульс тока вызывает большее повышение температуры, чем импульс любой другой формы с таким же максимальным и средним значением мощности. Таким образом, в расчет вносится определенный запас.

Дальнейший расчет производят, пользуясь методом наложения, при котором прекращение действия импульса определенной мощности представляется в виде появления импульса равной мощности, но со знаком минус. Так, если действие прямоугольного импульса мощности P начинается в момент времени t_0, а заканчивается в момент времени t_1, то температура тиристора в момент t_2 выразится формулой

$$T_2 = PR_{(0,2)} - PR_{(1,2)}.$$

Здесь $R_{(0,2)}$ и $R_{(1,2)}$) — тепловые сопротивления, соответствующие интервалам времени $(t_2 - t_0)$ и $(t_2 - t_1)$.

Аварии предшествовал режим сварки на номинальном токе при мощности потерь P_0 и установившейся температуре тиристора $\Delta T = P_0 R_{уст}$. Повышение температуры в моменты времени t_1 и t_2:

$$\Delta T_1 = P_0 (R_{уст} - R_{(0,1)}) + P_{1\,max} R_{(0,1)};$$

$$\Delta T_2 = P_0 (R_{уст} - R_{(0,2)}) + P_{1\,max} (R_{(0,2)} - R_{(1,2)}).$$

В этих выражениях P_1 — максимальная мощность первого импульса аварийного тока, а интервал времени в миллисекундах $(t_1 - t_0) = \theta_1' = 20 P_{1ср}/P_{1\,max}$.

Если температура тиристора перед началом последнего импульса перегрузки $T_2 = T_0 + \Delta T_2$ не превышает 125 °С, то, пользуясь данными каталога, приведенными для этой температуры, следует убедиться, что амплитуда последнего импульса перегрузки не превышает допустимого значения ударного тока тиристора.

Наряду с нагревом тиристора надежность работы фазорегулятора зависит от скорости нарастания прямого напряжения *du/dt* и прямого тока *di/dt* тиристора. Наибольшее значение *du/dt* на тиристоре возникает в момент восстановления анодного напряжения после прохождения очередной полуволны тока во втором тиристоре. Скорость восстановления анодного напряжения при коротком замыкании цепи нагрузки и $\varphi = \pi/2$ достигает 20—40 В/мкс и может вызвать самопроизвольное включение тиристора. Включение одного из тиристоров сразу после окончания проводимости другого эквивалентно замене тиристора неуправляемым диодом. В первичной цепи сварочного трансформатора появляется постоянная составляющая тока, нарастание тока сопровождается сильной вибрацией и повышенным «гудением» трансформатора.

Величина *du/dt* может быть снижена включением конденсатора параллельно первичной обмотке силового трансформатора. При включенном тиристоре конденсатор заряжен до сетевого напряжения, а с момента выключения тиристора разряжается на первичную обмотку трансформатора со скоростью, определяющей величину *du/dt* на втором тиристоре фазорегулятора. В ТТ с прерывистым регулированием тока *du/dt* определяется емкостью конденсатора в цепи импульсной стабилизации и сопротивлением цепи его разряда. Так, в трансформаторе

ТДФЖ-1002 при емкости конденсатора в цепи импульсной стабилизации $C = 10$ мкФ величина du/dt снижается до 3 В/мкс.

Необходимость учета di/dt объясняется тем, что процесс открытия тиристора развивается сначала лишь в окрестности управляющего электрода. При больших значениях di/dt в этой зоне происходит местный перегрев и пробой тиристора. Допустимые значения di/dt приведены в информационных материалах на тиристоры; например, для таблеточного тиристора Т2-320 $di/dt = 40$ А/мкс. В ТТ величина di/dt наиболее велика при коротком замыкании сварочной цепи и угле зажигания $\varphi = \pi/2$:

$$(di/dt)_{\max} = \sqrt{2}\,\omega I_{\text{к. з}} = 4{,}44 I_{\text{к.з}} \cdot 10^{-4},$$

где $I_{\text{к. з}}$ — действующее значение тока фазорегулятора в режиме короткого замыкания.

В аварийном режиме амплитуды импульсов тока тиристора и соответственно di/dt в 5—10 раз выше, чем в номинальном режиме. В ТТ с цепью импульсной стабилизации величина di/dt определяется крутизной фронта стабилизирующего импульса, которая приблизительно на порядок выше крутизны фронта рабочего тока трансформатора. В трансформаторе ТДФЖ-1002 составляющая di/dt, обусловленная стабилизирующим импульсом, равна 4,1 А/мкс, в то время как при нарастании первичного тока трансформатора $di/dt = 0{,}27$ А/мкс.

Система импульсно-фазового управления (СФУ) тиристорных трансформаторов. Эта система содержит фазосдвигающее (ФУ) и выходное (ВУ) устройства. Фазосдвигающее устройство осуществляет привязку СФУ к сети переменного тока, от которой питается ТТ, и обеспечивает формирование управляющих импульсов и плавное изменение их фазы относительно напряжения сети. Для управления двумя противофазными тиристорами обычно используется одно ФУ. Импульсы с ФУ на силовые тиристоры поступают не непосредственно, а через усилительное ВУ, которое окончательно формирует импульсы с параметрами, обеспечивающими гарантированное включение любого тиристора данного типа в выбранной силовой схеме ТТ и в заданном диапазоне температур. При этом мощность потерь в цепи управления тиристора не должна превышать допустимого значения.

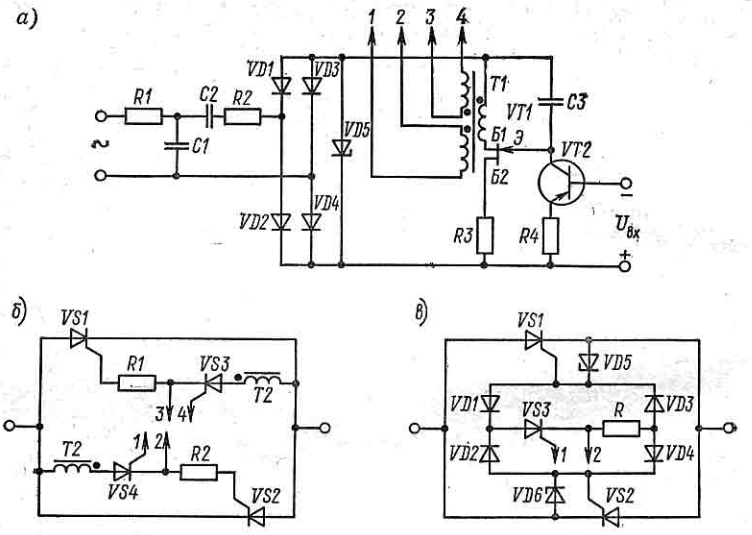


Рис. 8.24. Система импульсно-фазового управления ТТ: *а* — фазосдвигающее устройство; *б*, *в* — выходные устройства

В целом СФУ должна быть помехоустойчивой, надежной, обладать высоким быстродействием, обеспечивать требуемый диапазон изменения фазы импульсов, их симметрию в оба полупериода, необходимые их параметры — амплитуду и длительность.

Примеры реализации элементов СФУ, нашедших широкое применение в отечественных ТТ, показаны на рис. 8.24.

Фазосдвигающее устройство. Принцип действия ФУ (рис. 8.24, *а*) основан на заряде конденсатора *С3* до определенного уровня с последующим его разрядом на первичную обмотку импульсного трансформатора *Т1*. Зарядная цепь питается трапецеидальным выпрямленным напряжением, снимаемым со стабилитрона *VD5*, включенного на выходе выпрямительного моста *VD1—VD4*. На входе выпрямительного моста установлен интегродифференцирующий фильтр (*С1*, *С2*, *R1*, *R2*), способствующий уменьшению влияния на ФУ искажений напряжения питающей сети.

Конденсатор *С3* заряжается коллекторным током транзистора *VT2*, включенного по схеме с общим эмиттером.

Ток коллектора $i_к$ и напряжение U_{C3} на конденсаторе *C3* равны

$$i_к = \frac{U_{вх}}{R_4}; \quad U_{C3} = \frac{1}{C_3}\int i_к dt = \frac{U_{вх}}{R_4 C_3} t,$$

где $U_{вх}$ — сигнал управления на входе ФУ.

Заряд конденсатора *C3* происходит до тех пор, пока напряжение на нем не достигнет значения $U_{C3} = k_п U_1$, где U_1 — напряжение питания схемы, равное напряжению стабилизации стабилитрона *VD5*; $k_п = 0{,}65 \ldots 0{,}9$ — коэффициент переключения однопереходного транзистора *VT1*. После этого однопереходный транзистор *VT7* открывается и конденсатор *C3* разряжается на первичную обмотку импульсного трансформатора *T1*. Образующиеся импульсы длительностью около 10 мкс поступают через вторичные обмотки трансформатора *T1* на выходное устройство (зажимы *1—4*).

Зависимость угла зажигания φ в радианах от $U_{вх}$

$$\varphi = \omega t = 2\pi f R_3 k_п U_1 / U_{вх}$$

является характеристикой управления ФУ. Ее линейная зависимость от параметров схемы позволяет компенсировать влияние разброса параметров подстройкой резистора *R4*.

После разряда конденсатора *C3* происходит восстановление запирающей способности транзистора *VT1* и повторный заряд конденсатора *C3*. Этот процесс образования пилообразного напряжения заканчивается в конце полупериода питающего напряжения при спаде трапецеидального напряжения стабилитрона *VD5* до нуля и возобновляется в начале следующего полупериода. При нулевом значении питающего напряжения конденсатор *C3* полностью разряжается, что обеспечивает синхронизацию работы ФУ с напряжением питающей сети.

Выходное устройство. Для формирования и усиления импульсов управления силовыми тиристорами может быть использовано напряжение вспомогательного трансформатора или анодное напряжение самих тиристоров.

Маломощный тиристор *VS3* (*VS4*) (рис. 8.24, *б*) является коммутатором в цепи, состоящей из обмотки вспомогательного трансформатора *T2*, токоограничивающего резистора *R1* (*R2*) и управляющего перехода силового тиристора *VS1* (*VS2*). Тиристоры *VS3* (*VS4*) включены в противофазные цепи, и поэтому, несмотря на то что

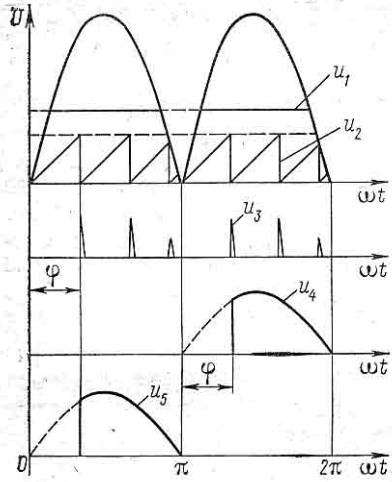


Рис. 8.25. Диаграмма напряжений на элементах СФУ

импульсы на их включение с ФУ поступают в оба полупериода, каждый из них открывается только в полупериод, когда анодное напряжение на нем положительно.

Схема *ВУ* с включением силовых тиристоров *VS1* (*VS2*) от своего анодного напряжения приведена на рис. 8.24, *в*. Маломощный тиристор *VS3* включен последовательно с токоограничивающим резистором *R* в диагональ моста на диодах *VD1—VD4*. На управляющий электрод тиристора *VS3* поступают импульсы с зажимов *1*, *2* ФУ. Силовой тиристор, например *VS1*, включается от своего анодного напряжения по цепи: стабилитрон *VD6*, диод *VD2*, тиристор *VS3*, резистор *R*, диод *VD3*, управляющий электрод тиристора *VS1*. Включение силового тиристора *VS1* или *VS2* происходит при наличии на нем положительного анодного напряжения в момент включения тиристора *VS3* от импульса с ФУ. Включаясь, силовой тиристор *VS1* или *VS2* шунтирует мост *VD1—VD4*, и ток управления прекращается. Стабилитроны *VD5*, *VD6* ограничивают напряжения на управляющих электродах силовых тиристоров.

Работа СФУ с ВУ по схеме рис. 8.24, *б* иллюстрируется диаграммой напряжений, приведенной на рис. 8.25. Трапецеидальное напряжение питания ФУ u_1 формируется из синусоидального выпрямленного напряжения. Пилообразное напряжение u_2 характеризует заряд конденсатора *C3*. Образованные при разряде конденсатора импульсы напряжения u_3 на вторичных обмотках трансформатора ФУ управляют моментами срабатывания (угол φ) маломощных тиристоров *VS3* и *VS4*. Импульсы напряжения u_4 и u_5, управляющие противофазными силовыми тиристорами *VS1* и *VS2*, поступают с обмоток вспомогательного трансформатора *T2* через тиристоры *VS3* и *VS4*.

Длительность импульсов управления в этой схеме равна π—φ. При использовании выходного устройства с включением от анодного напряжения (рис. 8.24, *в*) длительность импульсов определяется временем включения силовых тиристоров. Однако обе схемы исключают возникновение рассмотренного ранее «полуволнового эффекта», одна — из-за большой длительности импульсов, другая — из-за наличия на выходе ФУ последовательности управляющих импульсов.

ВУ по схеме рис. 8.24, *б* следует признать более помехоустойчивым и надежным вследствие того, что вспомогательные тиристоры *VS3* и *VS4* здесь работают при низких напряжениях. Однако вторая схема, требующая наличия вспомогательных тиристоров и диодов (*VS3*, *VD1—VD4*), позволяет снизить потери в цепи управления силовых тиристоров. В настоящее время обе схемы находят применение в промышленных ТТ.

Элементы расчета СФУ тиристорных трансформаторов. При расчете СФУ особый интерес представляет подход к выбору диапазона регулирования фазы импульсов и параметров управляющих импульсов с учетом потерь в цепи управления тиристора.

Диапазон регулирования фазы импульсов непосредственно связан с техническими параметрами ТТ. Минимальный угол зажигания φ_{min} должен соответствовать работе ТТ при максимальных сварочном токе I_{22} и рабочем напряжении u_{22} и пониженном на 15 % напряжении сети. ТТ при этом должен работать в полнофазном режиме, а угол φ_{min} должен быть равен углу сдвига между напряжением и током, который можно определить по известному соотношению

$$\varphi_{min} = \arccos \frac{\pi U_{22}}{2\sqrt{2} \cdot 0{,}85 U_{20}}.$$

Максимальный угол зажигания φ_{max} должен соответствовать работе ТТ при коротком замыкании сварочной цепи в режиме минимального тока (напряжения) и при повышенном на 10 % напряжении сети. В режиме короткого замыкания импульс тока нагрузки практически симметричен относительно нуля сетевого напряжения. Зная относительное значение этого тока короткого замыкания и определив по кривой рис. 8.20, *б* величину θ_{min}, можно вычислить

$$\varphi_{max} = \pi - \theta_{min}/2.$$

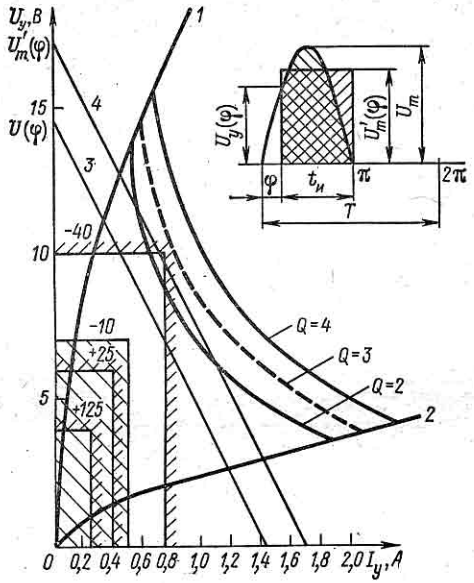


Рис. 8.26. Характеристики управления тиристором Т2-320

Подход к расчету параметров управляющих импульсов покажем на примере трансформатора ТДФЖ-1002 с тиристорами Т2-320 и выходным устройством по схеме рис. 8.24, *б*. Напряжение вторичных обмоток вспомогательного трансформатора 14 В, сопротивление балластного резистора $R_б = 10$ Ом. Диапазон изменения фазы импульсов $60° \leqslant \varphi \leqslant 120°$. Характеристики управления тиристором Т2-320 приведены на рис. 8.26. В каталогах на тиристоры значения допустимой мощности потерь в цепи управления тиристором $P_{доп}$ приведены для прямоугольных импульсов при заданной скважности. Поэтому синусоидальный сигнал управления необходимо заменить эквивалентным прямоугольным сигналом той же мощности и длительности (скважности) $t_и = \pi - \varphi$ (рис. 8.26).

Амплитуда эквивалентного импульса

$$U'_m = U_m \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{Q}{8\pi} \sin \frac{4\pi}{Q}},$$

где $Q = 2\pi/(\pi - \varphi)$ — скважность импульса управления. В нашем случае $Q = 3$; $U_m = 16$ В.

Построим на рис. 8.26 зону разброса параметров управления тиристором Т2-320 для $T_0 = -10$ °С. Она ограничена крайними вольт-амперными характеристиками *1* и *2*, а также прямыми с координатами $U_у = 7$ В; $I_у = 0{,}5$ А. Эти значения $U_у$ и $I_у$ получены интерполяцией данных каталога. Линия нагрузки *3* соответствует амплитуде фронта управляющего импульса $U_у(\varphi_{min}) = U_у(\varphi_{max}) = 0{,}86U_m$, определенной при напряжении питающей сети, пониженном на 15 %. Очевидно, что линия нагрузки лежит в зоне гарантированного включения тиристора.

Линия нагрузки *4* соответствует амплитудному напряжению эквивалентного прямоугольного импульса, рассчитанному с учетом повышенного напряжения сети на 5 %. Кривая допустимой мощности для $Q = 3$ (на рисунке обозначена штриховой линией) $P_{доп}(Q) = 8{,}4$ Вт не пересекает линию нагрузки *4*, т. е. мощность импульсов управления не превышает допустимого значения.

В тех случаях, когда при заданной длительности импульсов управления трудно не превысить допустимую мощность, например при нижнем значении $T_0 = -40$ °С, может быть использовано выходное устройство по схеме рис. 8.24, *в*.

ТТ как замкнутая система автоматического регулирования. Если угол регулирования в СФУ задавать вручную и не изменять в процессе нагрузки, то ТТ будет работать на естественных внешних характеристиках, приведенных на рис. 8.18. В реальных трансформаторах, предназначенных для определенных видов сварки, прибегают к формированию внешних характеристик с требуемой крутизной. Например, при работе ТТ в составе сварочного автомата или с автоматической головкой для сварки под флюсом с независимой от дугового напряжения скоростью подачи электродной проволоки трансформатор должен иметь жесткую (пологопадающую) внешнюю характеристику. Многочисленными экспериментами установлена оптимальная крутизна характеристики $(5 \ldots 10) \times 10^{-3}$ В/А. При более жестких характеристиках увеличивается амплитуда колебаний сварочного тока, вызванных процессами саморегулирования дуги. Увеличение наклона характеристик затрудняет стабилизацию дугового напряжения.

Для формирования заданных внешних характеристик трансформатора, а также для стабилизации режима сварки

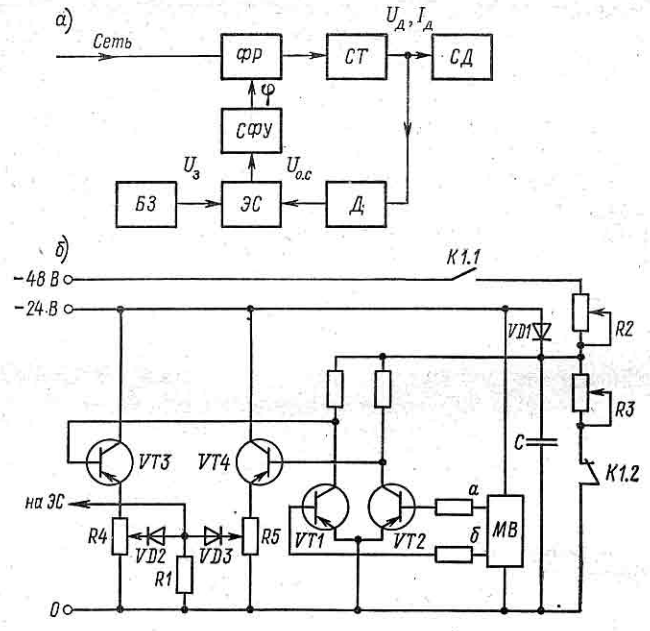


Рис. 8.27. Структурная схема ТТ (*а*) и схема блока задания тока (*б*)

в ТТ применяют замкнутые системы автоматического регулирования. Структурная схема ТТ как объекта автоматического регулирования приведена на рис. 8.27, *а*. Силовой трансформатор *СТ* с фазорегулятором *ФР* в первичной (или вторичной) цепи подключены к нагрузке — сварочной дуге *СД*. Фазорегулятор снабжен системой импульсно-фазового управления *СФУ*. На вход системы *СФУ* с элемента сравнения *ЭС* поступает разность сигналов $U_з - U_{о.с}$ с блока задания *БЗ* регулируемой величины и датчика сигнала обратной связи *Д*. Обычно элементом сравнения является транзистор или компаратор, входящий в состав СФУ.

Блок задания регулируемой величины. Напряжение на блоке задания может быть постоянным или изменяться во времени по заданному закону. На рис. 8.27, *б* приведена упрощенная схема блока задания тиристорной установки для сварки неплавящимся электродом с импульсной модуляцией тока дуги.

Во время импульса на выходе *а* мультивибратора *МВ* появляется отрицательный потенциал, а потенциал вы-

вода *б* равен нулю. Во время паузы потенциалы выводов мультивибратора меняются местами. Транзистор *VT1* открыт в течение паузы сварочного тока, а транзистор *VT2* — в течение импульса.

В режиме непрерывной сварки мультивибратор находится в состоянии «импульс», транзистор *VT2* открыт, а транзистор *VT4* закрыт. С учетом значения входного сопротивления эмиттерного повторителя (транзистор *VT3*) напряжение на резисторе *R4* практически равно напряжению на конденсаторе *C*.

В начале сварки замыкающий контакт *K1.1* замыкается, начинается заряд конденсатора со скоростью, регулируемой резистором *R2*. Нарастание выходного напряжения, которое снимается с резистора *R1*, обеспечивает нарастание сварочного тока и постепенный нагрев электрода. Когда напряжение на конденсаторе *C* достигнет значения напряжения питания (—24 В), откроется диод *VD1* и заряд конденсатора прекратится.

В конце цикла сварки конденсатор разряжается через размыкающий контакт *K1.2* и резистор *R3*. Плавное уменьшение напряжения задания обеспечивает заварку кратера шва.

В режиме сварки пульсирующей дугой напряжение конденсатора поочередно подается на вход транзисторов *VT3* и *VT4* и делится потенциометрами *R4* («амплитуда импульса») и *R5* («амплитуда паузы»). Сигналы задания тока импульса и тока паузы через разделительные диоды *VD2* и *VD3* суммируются на резисторе *R1* и поступают на элемент сравнения с сигналом обратной связи.

Скорость отработки команды с блока задания системой автоматического управления иллюстрируется осциллограммой (рис. 8.19, *б*), на которой записан импульс мультивибратора и соответствующее изменение сварочного тока в ТТ.

Датчики тока и напряжения. Датчиком сигнала обратной связи по сварочному току в ТТ с падающими внешними характеристиками обычно служит трансформатор тока, первичной обмоткой которого является сварочный провод. Трансформатор тока может быть выполнен на шихтованном или витом магнитопроводе. Вторичная обмотка трансформатора нагружена на резистор обратной связи, в котором рассеиваемая мощность $P_{о.с} = I_д U_{о.с}/w_2$, где $I_д$ — ток дуги; $U_{о.с}$ — требуемый сигнал обратной связи по току; w_2 — число витков вторич-

ной обмотки трансформатора тока. Обычно значение $U_{о.с}$ не превышает 10 В. Увеличение числа витков приводит к снижению мощности резистора, но при этом увеличивается трудоемкость изготовления трансформатора тока.

В ТТ с воздушной реакторной обмоткой в окне силового трансформатора сигнал обратной связи по току может быть снят непосредственно с реакторной обмотки, ЭДС которой пропорциональна сварочному току. Если реакторная обмотка включена в первичную цепь силового трансформатора, то должна быть использована трансформаторная развязка, исключающая попадание высокого напряжения в схему фазового управления током.

В ТТ с регулируемой постоянной составляющей сварочного тока должно быть два датчика тока: в цепях тиристора прямой и обратной полуволны сварочного тока.

Датчики напряжения используются для формирования жесткой характеристики и обычно представляют собой резисторные делители, подключенные к выходным зажимам ТТ. При больших падениях напряжения в сварочных проводах ($I_д x_{пр}$) точность поддержания заданного значения напряжения дуги снижается. В таких случаях целесообразно брать сигнал обратной связи непосредственно с изделия и сварочной головки.

Работа тиристорного трансформатора на несимметричную нагрузку. В ряде случаев сварки неплавящимся электродом существует значительное различие напряжений дуги прямой и обратной полярности, что вызывает в сварочной цепи составляющую постоянного тока.

Исследования ТТ с фазорегулятором в цепи вторичной обмотки сварочного трансформатора показали, что при питании дуги несимметричным напряжением, например при сварке алюминиевых сплавов в среде аргона, постоянная составляющая сварочного тока равна 10—12 % действующего значения тока, что много ниже, чем в источниках с амплитудным регулированием сварочного тока, не оснащенных специальными устройствами подавления постоянной составляющей. Это явление отмечено во всех режимах сварки, кроме близких к полнофазному. Физически небольшая постоянная составляющая тока объясняется наличием в сварочной цепи фазорегулятора, среднее (за период) напряжение на котором может быть отлично от нуля.

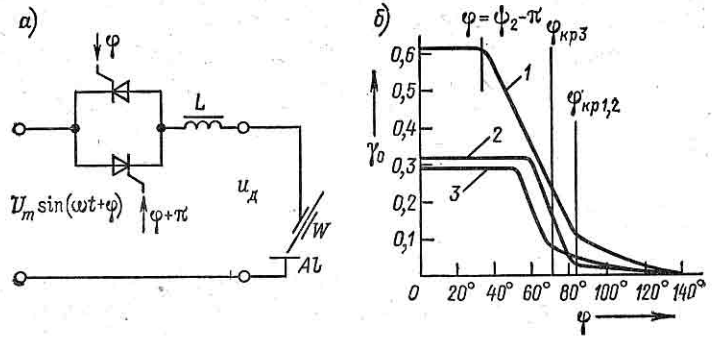


Рис. 8.28. Упрощенная схема замещения источника тока с фазорегулятором в сварочной цепи (*а*) и зависимости $\gamma_0 = f(\varphi_э)$ (*б*)
1 — $\varepsilon_1 = 0{,}25$; $\varepsilon_2 = -0{,}1$; *2* — $\varepsilon_1 = 0{,}15$; $\varepsilon_2 = -0{,}1$; *3* — $\varepsilon_1 = 0{,}3$; $\varepsilon_2 = -0{,}2$

Большой практический интерес представляет рассмотрение динамики роста постоянной составляющей при симметричном фазовом регулировании тока.

Упрощенная схема замещения источника тока с фазорегулятором в сварочной цепи представлена на рис. 8.28, *а*, где $U_m \sin(\omega t + \varphi)$ — мгновенное значение напряжения холостого хода сварочного трансформатора; φ — угол зажигания тиристоров; L — эквивалентная индуктивность сварочного контура; $u_д$ — мгновенное значение напряжения дуги. Уравнение тока дуги в относительных единицах

$$\gamma = -\cos(\theta - \varphi) - \varepsilon\theta + C,$$

где $\gamma = i_д/I_m = i_д \omega L/U_m$; $i_д$ — ток дуги; $\varepsilon = U_д/U_m$; $\theta = \omega t$; C — постоянная интегрирования.

Напряжение дуги принято не зависящим от тока:

$$u_{д1} = U_{д1} > 0; \quad u_{д2} = U_{д2} < 0; \quad |U_{д1}| > |U_{д2}|,$$

где $u_{д1}$, $U_{д1}$ — мгновенное и среднее (в зоне существования тока) значения напряжения обратной полярности («плюс» на электроде); $u_{д2}$, $U_{д2}$ — мгновенное и среднее значения напряжения прямой полярности.

Анализ уравнения тока дуги показал наличие трех режимов работы схемы: полностью управляемого режима (режима прерывистых токов); полууправляемого режима; неуправляемого (полнофазного) режима.

Временны́е диаграммы напряжения и тока для режима прерывистых токов представлены на рис. 8.29, *а*. В этом режиме по мере уменьшения угла зажигания φ увеличи-

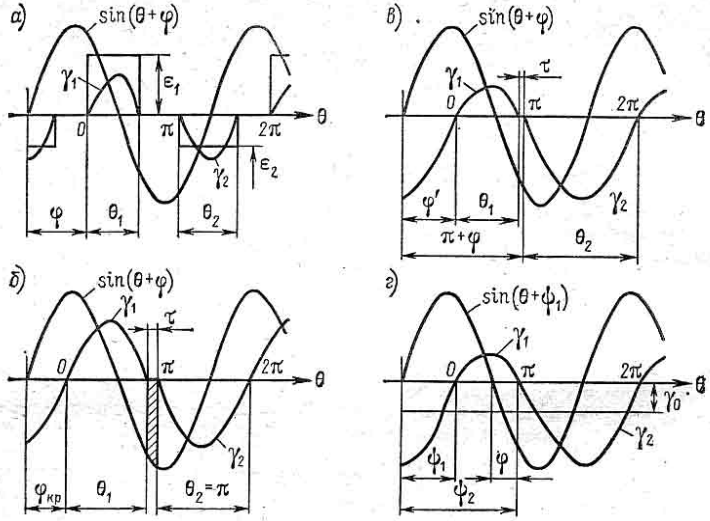


Рис. 8.29. Диаграммы напряжения и тока в случае несимметричной нагрузки

вается как амплитуда, так и длительность полуволны тока прямой и обратной полярности, причем $\theta_1 < \theta_2$. Постоянная составляющая $\gamma_0 = \gamma_{1ср} + \gamma_{2ср}$, равная сумме средних значений токов полупериодов, при уменьшении φ возрастает практически линейно (рис. 8.28, *б*), не превышая, однако, указанного выше значения 10—12 %.

При критическом угле зажигания $\varphi_{кр}$ длительность полуволны тока прямой полярности становится равной полупериоду: $\theta_2 = \pi$. При этом момент окончания тока прямой полярности совпадает с моментом включения тиристора, через который проходит ток обратной полуволны (рис. 8.29, *б*), режим прерывистых токов заканчивается. Угол зажигания $\varphi_{кр}$ зависит только от соотношений напряжения дуги прямой полярности и напряжения холостого хода:

$$\cos \varphi_{кр} = \frac{\pi}{2} \varepsilon_2.$$

Среднее значение напряжения дуги при критическом угле зажигания равно

$$\frac{1}{2\pi}(U_{д1}\theta_1 + U_{д2}\theta_2) = \frac{1}{2\pi} \int_{\pi-\tau}^{\pi} U_m \sin(\theta - \varphi_{кр})\, d\theta.$$

Таким образом, среднее значение напряжения дуги равно среднему за период напряжению на тиристорах (без учета падений напряжений на открытых тиристорах): $U_{д.\,ср} = U_{т.\,ср}$. Вольт-секундная площадка, соответствующая $U_{т.\,ср}$, показана на рис. 8.29, *б* штриховкой. Величина паузы τ приближенно может быть вычислена по формуле

$$\tau = \pi\,(\varepsilon_1 + \varepsilon_2).$$

При дальнейшем уменьшении угла зажигания (рис. 8.29, *в*) тиристор, через который проходит ток обратной полуволны, теряет управление, так как он может проводить ток только после погасания тиристора, через который проходит ток прямой полуволны (полууправляемый режим).

Фаза включения полуволны тока прямой полярности уменьшается, длительность ее растет; фаза включения полуволны тока обратной полярности φ' возрастает, длительность этой полуволны тока сокращается, увеличивается постоянная составляющая (крутовозрастающие участки на кривой рис. 8.28, *б*). Резкое нарастание постоянной составляющей тока продолжается до тех пор, пока не исчезнет бестоковая пауза и не установится неуправляемый (полнофазный) режим (рис. 8.29, *г*). Этому режиму соответствует угол зажигания

$$\varphi_{пф} = \frac{\theta_1}{2} - \arcsin\frac{\varepsilon_1\theta_1}{2\sin\frac{\theta_1}{2}},$$

где $\theta_1 = -2\pi\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}$.

Фазовые сдвиги токов прямой и обратной полярности соответственно равны

$$\psi_1 = \varphi_{пф} - \theta_1 + \pi; \quad \psi_2 = \varphi_{пф} + \pi.$$

Установившееся значение постоянной составляющей сварочного тока

$$\gamma_0 = \cos\psi_1 - \varepsilon_1\frac{\theta_1}{2}.$$

Диодно-тиристорное устройство ограничения постоянной составляющей сварочного тока. Результаты приведенного выше анализа, численные расчеты и экспериментальные данные показывают, что доля постоянной составляющей в токе дуги резко возрастает при изменении угла

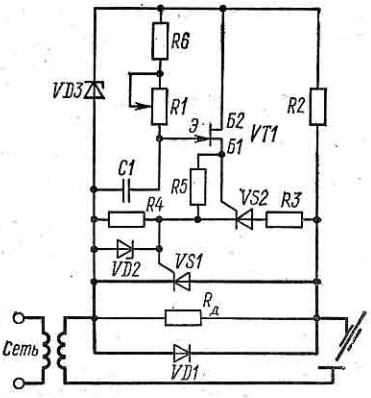


Рис. 8.30. Устройство ограничения постоянной составляющей сварочного тока

зажигания тиристоров от $\varphi_{кр}$ до $\varphi_{пф}$. Критический угол зажигания и соответствующая ему бестоковая пауза не зависят от индуктивного сопротивления цепи (уставки сварочного тока) и незначительно изменяются при изменении напряжения дуги в рабочих пределах (рис. 8.28, *б*). Таким образом, включив в сварочную цепь встречно-параллельно соединенные тиристоры и установив угол их зажигания $\varphi = \varphi_{кр}$, можно добиться эффективного ограничения постоянной составляющей тока с минимальной длительностью бестоковых пауз при переходе от обратной полярности к прямой. Значение сварочного тока при этом можно регулировать любым известным способом амплитудного (индуктивного) управления.

Поскольку тиристор, через который проходит ток полуволны обратной полярности, при критическом угле зажигания теряет управление, его можно заменить неуправляемым диодом. Устройство такого типа успешно используется в установках аргонодуговой сварки УДГ-301-1 и УДГ-501-1 взамен конденсаторной батареи.

В настоящее время на ряде производств широко применяются сборные посты ручной аргонодуговой сварки, состоящие из сварочного трансформатора с механическим регулированием тока, устройства подавления постоянной составляющей тока — конденсаторной батареи или балластного реостата и осциллятора. Дефицитная батарея или балластный реостат, ухудшающий качество сварки, могут быть заменены приведенным на рис. 8.30 устройством. Сварочный ток полуволны обратной полярности проходит через диод *VD1*. Ток полуволны прямой полярности проходит через тиристор *VS1*, который открывается спустя приблизительно 0,001 с после появления на его аноде напряжения $u = U_{20} - U_д$. Ток дуги от момента окончания полупериода обратной полярности до включения ти-

ристора поддерживается на минимально необходимом уровне через резистор $R_д$.

Выдержка времени $\tau \approx 0{,}001$ с обеспечена схемой, действие которой аналогично работе рассмотренного выше ФУ. Конденсатор *C1* заряжается с постоянной времени $\tau' = R_1C_1$ до напряжения переключения $U_C = \eta U_п$, где $U_п$ — напряжение стабилизации стабилитрона *VD3*. Ток стабилитрона задан балластным резистором *R2*. В момент переключения однопереходного транзистора *VT1* разрядный ток конденсатора открывает вспомогательный маломощный тиристор *VS2*, и в цепь управления тиристором *VS1* поступает импульс тока необходимой длительности.

Ток управления ограничен резистором *R3*, напряжение — стабилитроном *VD2*. После включения тиристора *VS1* все элементы схемы управления практически обесточиваются. Малое время нагрузки на эти элементы (как и на резистор $R_д$) позволяет выполнить устройство достаточно компактным.

В условиях естественного воздушного охлаждения в силовой цепи можно использовать тиристор Т-500 и два диода В-200, включенных в параллель.

Ограничение напряжения холостого хода в тиристорных трансформаторах для ручной дуговой сварки. При эксплуатации сварочных трансформаторов для ручной дуговой сварки в особо опасных условиях необходимо применять устройства снижения напряжения холостого хода трансформатора (УСНТ). В ТТ для ручной дуговой сварки функции УСНТ может выполнять фазорегулятор трансформатора. К схеме управления ТТ с УСНТ предъявляются следующие требования:

1. Действующее значение напряжения холостого хода трансформатора $U_{х.\,х}$ не должно превышать безопасного значения $U_б$.

2. Прикосновение электрода к изделию должно вызывать переключение схемы управления трансформатором из режима холостого хода в рабочий режим. Время включения не должно превышать 0,02 с.

Сопротивление сварочной цепи в момент включения $R_{вкл}$ с учетом возможного загрязнения свариваемого изделия и ржавчины принимается достаточно большим. Требование высокой чувствительности УСНТ подразумевает снижение способности трансформатора к пробою промежутка электрод—изделие, вызванное уменьшением $U_{х.\,х}$.

3. При увеличении сопротивления сварочной цепи до значения сопротивления выключения $R_{выкл}$ и более должно произойти переключение схемы управления трансформатора из рабочего режима в режим холостого хода. Переключение происходит с выдержкой времени, обеспечивающей сохранение рабочего режима трансформатора при случайных или вызванных технологической необходимостью кратковременных обрывах дуги. Величина $R_{выкл}$ эквивалентна минимально возможному электрическому сопротивлению тела человека.

Ниже приведен краткий анализ схемных решений задачи снижения напряжения холостого хода тиристорного трансформатора.

1. Параллельно тиристорам фазорегулятора включается активное или активно-емкостное сопротивление, подбором значения которого устанавливается требуемое пониженное значение $U_{х.\,х}$. В момент замыкания электрода на изделие в сварочной цепи появляется токовый сигнал, который через трансформатор тока поступает на электронное устройство, разрешающее прохождение сигнала задания сварочного тока с БЗТ на вход ФУ. При увеличении сопротивления вторичной цепи трансформатора до $R_{выкл}$ и выше с ФУ снимается задающий сигнал, тиристоры фазорегулятора закрываются, устанавливается режим холостого хода.

УСНТ такого типа реализовано в экспериментальных образцах ТТ с подпиткой и с прерывистым регулированием тока [19], оно сравнительно просто, но имеет существенные недостатки:

индуктивное сопротивление первичной обмотки силового трансформатора в режиме холостого хода заметно зависит от качества его сборки. Отсюда следует требование индивидуальной настройки сопротивления, шунтирующего фазорегулятор, причем регулируемый резистор находится под напряжением сети;

разброс значений шунтирующего сопротивления вызывает разброс значений токового сигнала во вторичной цепи трансформатора. Если учесть сравнительную близость порогов срабатывания и отпускания схемы ($R_{вкл}$ и $R_{выкл}$), то сложность настройки УСНТ такого типа становится очевидной;

низкое значение $U_{х.\,х}$ трансформатора (рис. 8.31, *а*) затрудняет возбуждение дуги на сильно окисленном или загрязненном изделии.

2. В режиме холостого хода на вход ФУ подается сигнал, обеспечивающий включение тиристоров фазорегулятора при больших углах φ (рис. 8.31, *б*). Несложной настройкой можно установить требуемое значение $U_{х.\,х}$. В остальном работа схемы аналогична описанной выше.

3. Применение рассмотренных схем с УСНТ связано с отработкой весьма слабых сигналов, поскольку используемый в них трансформатор тока, рассчитанный на максимальный сварочный ток, имеет большой коэффициент трансформации.

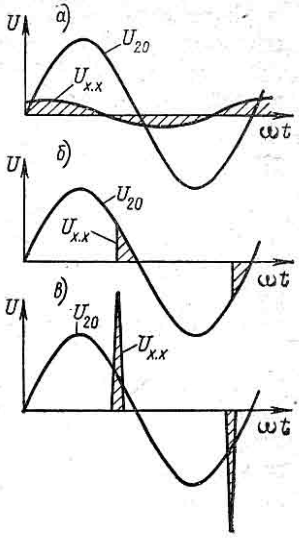


Рис. 8.31. Кривые напряжения холостого хода тиристорных трансформаторов с УСНТ

Перспективным в этом отношении представляется УСНТ, основанное на импульсном измерении проводимости межэлектродного промежутка: в режиме холостого хода в сварочную цепь «инжектируется» кратковременный (10—20 мкс) импульс напряжения с амплитудой 300—400 В (рис. 8.31, *в*). Действующее значение $U_{х.\,х}$ при частоте наложения импульсов 100 Гц не превышает $U_б$. Из-за своей малой длительности измерительные импульсы не представляют опасности для человека, но обеспечивают прохождение в сварочной цепи импульсов тока с амплитудой несколько ампер при сопротивлении между электродом и изделием, равном $R_{вкл}$. Высокая скорость нарастания импульсного тока позволяет легко выделить его, например с помощью трансформатора тока с одним первичным витком, нагруженного на последовательно соединенные конденсатор и резистор. Импульсный сигнал с резистора подается в схему управления ТТ, а низкочастотный сигнал, пропорциональный сварочному току, выделится на конденсаторе. Высоковольтный измерительный импульс будет способствовать пробою межэлектродного промежутка и улучшению возбуждения сварочной дуги.

УСНТ последнего типа особенно перспективно с тиристорными трансформаторами с цепью импульсной стабилизации, в которых стабилизирующий импульс может выполнять и функцию измерения.

8.5. СЕРИЙНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Трансформаторы для ручной дуговой сварки. Трансформаторы выпускаются по ГОСТ 95—77. Все трансформаторы работают при естественной вентиляции и соответствуют степени защиты IP22. Длительность цикла сварки для трансформаторов принята 5 мин.

Трансформаторы выпускаются в переносном и передвижном исполнении. Переносные, или облегченные, трансформаторы предназначены для прихваточных и ремонтных работ, где продолжительность нагрузки (ПН) не превышает 20—25 %. Передвижные трансформаторы предназначены для обычных условий работы с ПН = 60 %.

Трансформаторы серии ТД с механическим регулированием. Технические данные трансформаторов серии ТД приведены в табл. 8.2. Трансформаторы на номинальные токи 160 и 250 А являются переносными, на токи 315 и 500 А — передвижными. Основные узлы каждого трансформатора—магнитопровод, первичные и вторичные обмотки, механизм регулирования тока, переключатель диапазонов тока, токоуказательный механизм, кожух. По принципу регулирования это трансформаторы с подвижными обмотками.

Магнитопровод трансформатора — стержневого типа, наборный из холоднокатаной стали марки 3412 толщиной 0,5 мм; катушки дисковые, расположены на двух стержнях магнитопровода.

У переносных трансформаторов на 160 и 250 А первичные обмотки выполнены подвижными, а вторичные обмотки неподвижно закреплены у верхнего ярма магнитопровода. У трансформаторов на 315 и 500 А первичные обмотки неподвижные и закреплены у нижнего ярма, а вторичные обмотки подвижные.

Подвижная обмотка крепится в изоляционной обойме из пресс-материала ГСП-32. Через верхнее ярмо магнитопровода пропущен ходовой винт, который ввинчивается в ходовую гайку, вмонтированную в обойму подвижной обмотки. При вращении ходового винта с помощью рукоятки, находящейся сверху трансформатора, изменяется

Таблица 8.2

Параметры	ТД-102	ТД-306	ТД-300	ТД-500	ТД-502	ТД-500-4
Номинальный сварочный ток, А	160	250	315	500		
Номинальное рабочее напряжение, В	26	30	33	40,0		
Минимальный сварочный ток, А, не более	60	100	60	100		
Минимальное рабочее напряжение, В	22,4	24,0	22,4	24,0		
Максимальный сварочный ток, А, не менее	175	300	360	560		
Максимальное рабочее напряжение, В	27,0	32,0	34,4	42,4		
Номинальный режим работы, ПН, %	20	25	60			
Коэффициент полезного действия, %	72	78	86	88,5		87,5
Коэффициент мощности	0,48	0,5	0,56	0,68	0,85	0,67
Напряжение холостого хода, В, не более			80			12
Климатическое исполнение и категория размещения	У2					
Класс изоляции	В, Н					
Габариты, мм:						
длина	570	630	692	720	765	780
ширина	325	370	620		670	
высота	530	585	710		835	
Масса, кг	38	67	135	180	210	200

расстояние между обмотками и регулируется сварочный ток. Для исключения вибрации подвижной обмотки обойма крепления ее снабжена плоскими пружинами, которые при перемещении скользят по магнитопроводу.

Схема соединения катушек обмоток переносных трансформаторов приведена ранее (см. рис. 8.8, *в*). Для получения диапазона больших токов катушки первичной обмотки соединяются последовательно, а катушки вторичной обмотки — параллельно; для получения диапазонов малых токов одна катушка вторичной обмотки отключается. Схема соединения катушек обмоток передвижных трансформаторов приведена на рис. 8.8, *б*. Попарное параллельное соединение катушек обмоток соответствует

диапазону больших токов, последовательное — диапазону малых токов. При последовательном соединении часть витков первичной обмотки отключается и напряжение холостого хода повышается. Это благоприятно отражается на стабильности горения дуги при сварке на малых токах. Переключение диапазонов в передвижных трансформаторах осуществляется специальным переключателем барабанного типа, рукоятка которого выведена на верхнюю крышку трансформатора.

Для указания значения сварочного тока имеется токоуказательный механизм секторного типа, закрепленный на магнитопроводе под крышей и связанный с подвижной обмоткой рычажной передачей. Отсчет тока производится по шкале через смотровое окно, расположенное на крышке кожуха. Шкала градуирована для двух диапазонов тока при номинальном напряжении питающей сети и при напряжении $U_2 = 20 + 0{,}04I_2$ в вольтах на выходных зажимах вторичной цепи. Точность показаний шкалы может находиться в пределах $\pm 7{,}5$ % от значения максимального тока, указанного на шкале, и является ориентировочной, так как значение сварочного тока зависит от подводимого напряжения и длины дуги. На концах шкалы имеются надписи «Стоп», предупреждающие о конце хода подвижной обмотки.

Защитный кожух трансформатора крепится болтами к осям, которые, в свою очередь, прикреплены к нижним стягивающим уголкам магнитопровода. Для подключения к сети сварочного кабеля имеются специальные доски зажимов, закрепленные на магнитопроводе с торцевых сторон кожуха. Доски зажимов закрываются защитными крышками. Для удобства перемещения передвижные сварочные трансформаторы снабжены четырьмя колесами и ручками, а для подъема имеют специальные скобы, расположенные на верхней части кожуха. Трансформаторы снабжены емкостными фильтрами, предназначенными для снижения помех радиоприему, создаваемых трансформаторами при сварке.

Внешние характеристики сварочных трансформаторов имеют крутопадающую рабочую часть со сравнительно небольшими кратностями тока короткого замыкания — примерно 1,2—1,3 значения сварочного тока при номинальном ребочем напряжении.

Трансформаторы, предназначенные для нужд народного хозяйства, выпускаются на напряжение сети 220,

Таблица 8.3

Параметры	ТД-102			ТД-306		
	Первичная обмотка		Вторичная обмотка	Первичная обмотка		Вторичная обмотка
	220 В	380 В		220 В	380 В	
Число катушек	2					
Размеры голого провода, мм	2,8×5,6	2,0×4,0	4,0×6,4	3,55×6,3	2,8×4,75	4,0×10
Марка провода	АПСД					
Число параллельных проводов	1					
Число витков в слое	9 сл.×11 + + 1 сл.×6	14	5 сл.×11 + + 1 сл.×10	8	10 сл.×12 + + 1 сл.×7	7
Число слоев	10	13	6	9	11	6
Число витков в катушке	105	182	65	72	127	42
Ответвления	*0—105*	*0—182*	*0—65*	*0—72*	*0—127*	*0—42*
Соединение катушек	Последовательное		Параллельное	Последовательное		Параллельное
Сопротивление катушек при 20 °С, Ом	0,17	0,54	0,015	0,1	0,31	0,0077
Масса комплекта, кг	4,0	3,8	3,9	4,9	4,8	4,9

Продолжение табл. 8.3

Параметры	ТД-300			ТД-500		
	Первичная обмотка		Вторичная обмотка	Первичная обмотка		Вторичная обмотка
	220 В	380 В		220 В	380 В	
Число катушек	2					
Размеры голого провода, мм	3,75×6,0	2,8×4,75	3,0×25	5,6×8,0	4,0×6,3	4,7×25
Марка провода	АПСД		АДО	АПСД		АДО
Число параллельных проводов	1					
Число витков в слое	8 сл.×12 + + 1 сл.×11	11 сл.×16 + + 1 сл.×11	30	4 сл.×12 + + 2 сл.×10 + + 1 сл.×4	3 сл.×14 + + 5 сл.×15 + + 1 сл.×9	20
Число слоев	9	12	1	7	9	1
Число витков в катушке	107	187	30	72	126	20
Ответвления	*0—84—107*	*0—144—187*	*0—32*	*0—58—72*	*0—102—126*	*0—20*
Соединение катушек	Последовательное и параллельное					
Сопротивление катушек при 20 °С, Ом	0,41	0,13	0,003	0,082	0,054	0,00153
Масса комплекта, кг	8,1	8,2	6,5	13,3	13,6	7,8

и 380 В и имеют алюминиевые обмотки. В переносных трансформаторах обмотки намотаны проводом марки АПСД, в передвижных трансформаторах первичные обмотки — проводом АПСД, вторичные — голой шиной марки АДО «на ребро». Обмоточные данные трансформаторов серии ТД приведены в табл. 8.3.

Трансформатор на ток 500 А выпускается в трех исполнениях. Трансформатор ТД-502 снабжен встроенным конденсатором мощностью 9,4 квар для повышения коэффициента мощности (cos φ). Трансформатор ТД-500-4 выпускается в комплекте с устройством снижения напряжения холостого хода УСНТ-06.

Трансформаторы серии ТДМ с механическим регулированием. В табл. 8.4 приведены технические данные новой серии трансформаторов с механическим регулированием ТДМ. В ближайшие годы эти трансформаторы заменят передвижные трансформаторы серии ТД (ТД-300, ТД-500, ТД-502, ТД-500-4). По принципу регулирования, схеме соединения катушек обмоток и конструктивному исполнению они близки к передвижным трансформаторам серии ТД.

В новых трансформаторах серии ТДМ применена холоднокатаная сталь марки 3414 толщиной 0,35 мм, наборные магнитопроводы имеют бесшпилечную конструкцию. Применены обмоточные и изоляционные материалы класса изоляции Н. Все это позволило снизить массу и габариты трансформаторов серии ТДМ. В трансформаторах усовершенствована конструкция переключателя диапазонов сварочного тока, переключатель ножевого типа выдерживает нечастые аварийные режимы, возникающие при его переключении, без снятия сетевого напряжения. Подключение сварочных и сетевых проводов производится при помощи штыревых разъемов, что облегчает эксплуатацию трансформаторов. Улучшен внешний вид трансформаторов.

Значительно расширена номенклатура трансформаторов. Базовые модели трансформаторов ТДМ-317 (рис. 8.32), ТДМ-401, ТДМ-503 рассчитаны соответственно на номинальные токи 315, 400 и 500 А. Трансформаторы ТДМ-317-1, ТДМ-401-1, ТДМ-503-1 предназначены для эксплуатации в особо опасных условиях, снабжены ограничителями холостого хода УСНТ-06, снижающими напряжение холостого хода до безопасного значения (12 В). Трансформатор ТДМ-503-2 имеет конденсатор мощностью 9,4 квар для повышения коэффициента мощ-

Таблица 8.4

Параметры	ТДМ-317	ТДМ-401	ТДМ-503	ТДМ-317-1	ТДМ-401-1	ТДМ-503-1	ТДМ-503-2	ТДМ-503-3	ТДЭ-402
Номинальный сварочный ток	315	400	500	315	400		500		400
Номинальное рабочее напряжение, В	32,6	36,0	40,0	32,6	36,0		40,0		44
Минимальный сварочный ток, А, не более	60	80	90	60	80		90		80
Минимальное рабочее напряжение, В	22,4	23,2	23,6	22,4	23,2		23,6		24,8
Максимальный сварочный ток, А, не менее	360	460	560	360	460		560		430
Максимальное рабочее напряжение, В	34,4	38,4	42,4	34,4	38,4		42,4		45,8
Номинальный режим работы, ПН, %					60				
Коэффициент полезного действия, %	86		88	86			88		86
Коэффициент мощности	0,56	0,6	0,65	0,56	0,6	0,65	0,85		0,61
Напряжение холостого хода, В, не более	80			12			80	12	
Климатическое исполнение и категория размещения					У2				У3
Класс изоляции					Н				
Габариты, мм:									
длина	555			760			660	820	590
ширина				585					595
высота	818	848	888	818	848		888		820
Масса, кг	130	145	170	145	160	185	195	210	180



Рис. 8.32. Трансформатор ТДМ-317

ности. Трансформатор ТДМ-503-3 снабжен конденсатором для повышения коэффициента мощности и ограничителем напряжения холостого хода типа УСНТ-06.

Обмоточные данные трансформаторов приведены в табл. 8.5.

Трансформатор типа ТДЭ-402. Тиристорный трансформатор ТДЭ-402 предназначен для ручной дуговой сварки, резки и наплавки металлов специальными электродами с железным порошком в обмазке, а также электродами общего применения. Технические данные трансформатора приведены в табл. 8.4. Трансформатор питает дугу прерывистым током, импульсная стабилизация дуги выполнена по схеме, показанной на рис. 8.16, *е*. Трансформатор имеет два диапазона регулирования сварочного тока, в пределах диапазона ток плавно регулируется с пульта дистанционного управления.

На рис. 8.33 приведена структурная схема трансформатора ТДЭ-402. Тиристорный фазорегулятор *ФР* включен в цепь первичной обмотки силового трансформатора *СТ* и выполняет функции регулятора тока и устройства сни-

Параметры	ТДМ-317		
	Первичная обмотка		Вторичная обмотка
	220 В	380 В	
Число катушек	2		
Размеры голого провода, мм	3,15×5,6	2,24×4,5	3,0×25
Марка провода	АПСД		АДО
Число параллельных проводов	1		
Число витков в слое	3 сл.×10+ +7 сл.×11	12 сл.× ×15+ +1 сл.×7	31
Число слоев	10	13	1
Число витков в катушке	107	187	31
Ответвления	*0—85—107*	*0—150—187*	*0—31*
Соединение катушек	Параллельное и последовательное		
Сопротивление катушек при 20 °С, Ом	0,054	0,164	0,003
Масса комплекта, кг	6,1	6,3	6,5

жения напряжения холостого хода. Ключевой элемент *К* пропускает сигнал задания $U_{зад}$ с блока задания тока *БЗТ* на элемент сравнения *ЭС* только при наличии разрешающего сигнала $U_{разр}$ с датчика обратной связи *ДТ* по току сварочной дуги *СД*. В рабочем режиме трансформатора ключ *К* закрыт, разность сигналов задания и обратной связи по току дуги поступает на вход системы фазового управления *СФУ* и определяет значение угла зажигания тиристоров φ и ток вторичной обмотки силового трансформатора. Через 1 с после обрыва дуги ключ *К* открывается, на выходных зажимах трансформатора устанавливается напряжение холостого хода, не превышающее 12 В. В течение указанной выдержки времени на вход *СФУ* подан сигнал задания тока без вычета $U_{о.с}$, что

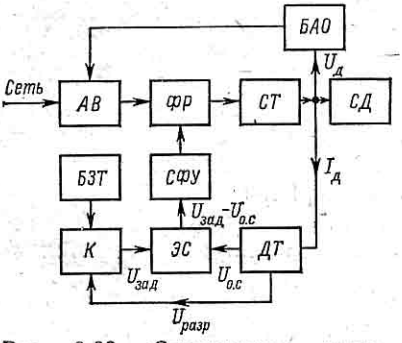


Рис. 8.33. Структурная схема трансформатора ТДЭ-402

Таблица 8.5

ТДМ-401			ТДМ-503		
Первичная обмотка		Вторичная обмотка	Первичная обмотка		Вторичная обмотка
220 В	380 В		220 В	380 В	
4,0×6,3 АПСД	2,8×5,3 АПСД	3,8×25 АДО	4,75×7,1 АПСД	3,35×5,6 АПСД	4,7×25 АДО
7 сл.×12+ +1 сл.×6	14	26	4 сл.×10+ +3 сл.×11	9 сл.×13+ +1 сл.×11	22
8	11	1	7	10	1
90	154	26	73	128	22
0—72—90	*0—126—154*	*0—26*	*0—62—73*	*0—104—128*	*0—22*
Параллельное и последовательное					
0,032	0,094	0,0022	0,068		0,0016
7,4	7,8	7,1	8,7	8,8	8,1

обеспечивает полное открытие тиристоров фазорегулятора и легкое повторное возбуждение дуги.

В аварийном режиме, например в случае пробоя одного из тиристоров, на выходных зажимах трансформатора появляется полное напряжение холостого хода $U_{20} = 80$ В. Если время наличия этого напряжения более 1 с, то блок аварийного отключения *БАО* подает команду на независимый расцепитель автоматического выключателя *АВ* и трансформатор отключается от сети.

Фазорегулятор выполнен на тиристорах ТЛ-200, управление тиристорами производится от собственного анодного напряжения по схеме, приведенной на рис. 8.24, *в*. Тиристоры работают при естественном охлаждении.

Внешние характеристики трансформатора ТДЭ-402 представлены на рис. 8.34.

Трансформаторы для автоматической сварки под флюсом. Трансформаторы выпускаются в стационарном исполнении, рассчитаны на продолжительный режим работы при принудительном воздушном охлаждении. Технические данные трансформаторов приведены в табл. 8.6.

Трансформаторы серии ТДФ. В основу их конструкции положен трансформатор с магнитным шунтом, подмагничиваемым постоянным

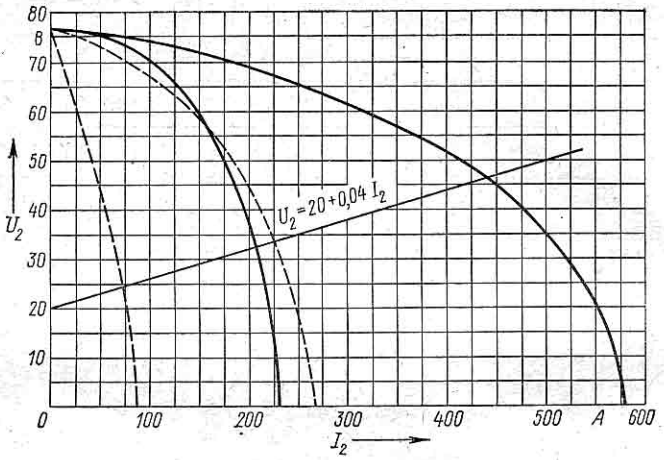


Рис. 8.34. Внешние характеристики трансформатора ТДЭ-402

Таблица 8.6

Параметры	ТДФ-1001У3	ТДФ-1601У3	ТДФЖ-1002У3	ТДФЖ-2002У3
Номинальный сварочный ток, А	1000	1600	1000	2000
Номинальное рабочее напряжение, В	44	60	56	76
Номинальный режим работы, ПВ, %	100			
Пределы регулирования рабочего напряжения, В	36—44	54—60	30—56	32—76
Пределы регулирования сварочного тока, А	400—1200	600—1800	300—1200	600—2200
Коэффициент полезного действия, %, не менее	87	88	86	88
Класс изоляции катушек	В		Н	
Масса, кг, не более	720	1000	550	850
Удельная материалоемкость, кг/кВт	17,1	10,4	9,8	5,6

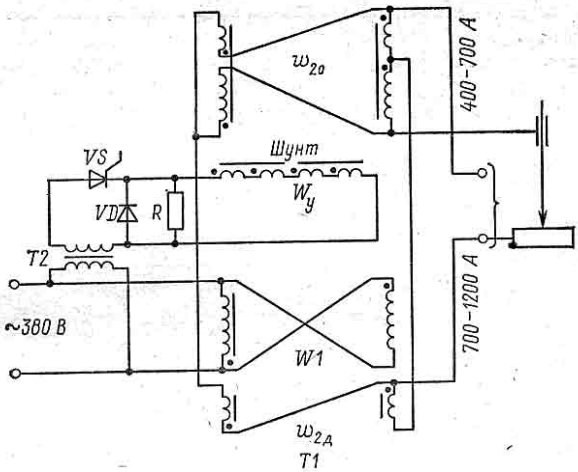


Рис. 8.35. Упрощенная схема трансформатора ТДФ-1001

током. На рис. 8.35 приведена упрощенная электрическая схема трансформатора ТДФ-1001.

На каждом стержне главного магнитопровода трансформатора *T1* расположены катушки первичной *W1* и вторичной обмоток. Вторичная обмотка состоит из двух частей: основная часть (w_{2o}) расположена у верхнего ярма главного магнитопровода, дополнительная часть $w_{2д}$ вместе с первичной обмоткой — у нижнего ярма главного магнитопровода. Магнитный шунт с обмоткой W_y расположен в окне главного магнитопровода между обмотками w_{2o} и *W1* на пути основного потока рассеяния трансформатора. Трансформаторы имеют плавно-ступенчатое регулирование сварочного тока.

Ступенчатое регулирование (две ступени) осуществляется переключением витков катушек вторичной обмотки. При переходе со ступени меньших токов на ступень бо́льших токов часть витков основной вторичной обмотки отключается и подключается дополнительная часть вторичной обмотки, индуктивное сопротивление трансформатора при этом снижается. Плавное регулирование тока в пределах одной ступени производится подмагничиванием магнитного шунта. Большему току управления соответствует больший сварочный ток.

Обмотка управления магнитного шунта питается от однотактного тиристорного выпрямителя, состоящего из вспомогательного трансформатора *T2*, тиристора *VS*, обратного диода *VD* и схемы фазового управления тиристором, выполненной на логическом элементе М-403 (на рис. 8.35 не приведена).

Сварочные трансформаторы ТДФ оборудованы пускорегулирующей и защитной аппаратурой. Предусмотрена возможность местного и дистанционного (с пульта управления сварочного автомата) включения и регулирования сварочного тока. Трансформаторы имеют падающие внешние характеристики. Такие характеристики позволяют получить хорошее формирование шва при работе со сварочными автоматами, снабженными системой автоматического поддержания заданного напря-

жения дуги (автоматы с зависимой от напряжения дуги скоростью подачи электродной проволоки).

Между тем в отечественной промышленности в последние годы получили распространение более простые и надежные автоматы и автоматические головки с независимой от напряжения дуги скоростью подачи проволоки. Сварочные трансформаторы ГДФ-1001 и ТДФ-1601 и другие трансформаторы с падающими характеристиками в составе автоматов такого рода не позволяют в ряде режимов сварки достичь достаточной стабильности параметров сварного шва. Небольшая выходная мощность существующих трансформаторов этой серии сдерживала внедрение в производство прогрессивных, форсированных режимов, особенно при многодуговой сварке труб большого диаметра. Выпуск трансформаторов ТДФ прекращен в 1980 г.

Трансформаторы серии ТДФЖ. Номинальные параметры трансформаторов ТДФЖ соответствуют требованиям ГОСТ 7012—77 на трансформаторы для автоматической сварки под флюсом. Трансформаторы этой серии имеют тиристорное регулирование и обеспечивают импульсную стабилизацию процесса сварки.

Силовой трансформатор выполнен по схеме, приведенной на рис. 8.22. Магнитопровод трансформатора наборный, бесшпилечной конструкции, изготовлен из стали марки 3414 толщиной 0,35 мм. Обмотки выполнены шиной, намотанной «на ребро». В трансформаторе ТДФЖ-1002 применена алюминиевая шина марки АДО, в ТДФЖ-2002 — медная шина марки МГМ. Первичная и вторичная обмотки состоят каждая из двух катушек, разделенных для удобства на две последовательно соединенные секции. Между секциями катушек вторичной обмотки установлены обмотки импульсной стабилизации.

В окне трансформатора размещены две катушки реакторной обмотки, позволяющей производить ступенчатое регулирование тока. В трансформаторе ТДФЖ-1002 полный диапазон регулирования разбит на две, а в трансформаторе ТДФЖ-2002 — на три ступени; третья ступень регулирования в трансформаторах ТДФЖ-2002 обеспечивает возможность сварки при больших (до 40 В) падениях напряжения в сварочных проводах.

В трансформаторе ТДФЖ-1002 для создания диапазона мелких токов катушки реакторной обмотки включены последовательно и согласно по отношению к первичной обмотке; в трансформаторе ТДФЖ-2002 катушки реакторной обмотки включены последовательно для сварки в диапазоне малых токов и параллельно — в диапазоне средних токов. При сварке в диапазоне больших токов реакторные обмотки не включаются.

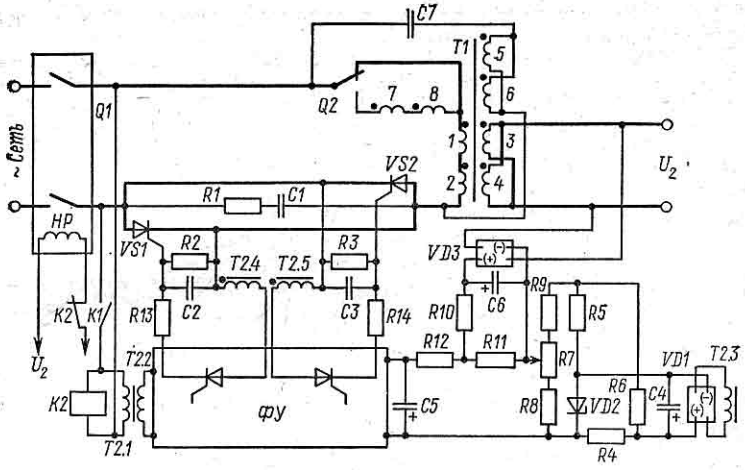


Рис. 8.36. Упрощенная схема трансформатора ТДФЖ-1002

Упрощенная принципиальная электрическая схема трансформатора ТДФЖ-1002 приведена на рис. 8.36, внешний вид трансформатора — на рис. 8.37.

Тиристоры *VS1* и *VS2* регулируют напряжение на первичной обмотке силового трансформатора *T1*. При сварке в диапазоне малых токов последовательно с первичной обмоткой трансформатора включают две воздушные катушки реакторной обмотки.

Защита силовых тиристоров *VS1* и *VS2* от коммутационных перенапряжений производится *RC*-цепью (*C1* и *R1*). Защита управляющих переходов тиристоров от случайных сигналов осуществляется резисторами *R2* и *R3* и конденсаторами *C2* и *C3*. Импульсы управления поступают на тиристоры с ФУ, на вход которого подана разность сигналов задания рабочего напряжения и обратной связи.

Цепь задания рабочего напряжения питается от обмотки *T2.3* вспомогательного трансформатора *T2*. После выпрямления диодным мостом *VD1* и сглаживания конденсатором *C4* напряжение подается через резистор *R4* на стабилитрон *VD2*. Для параметрической стабилизации рабочего напряжения трансформатора используется делитель из резисторов *R5* и *R6*. На потенциометр задания рабочего напряжения *R7* подается разность стабилизи-

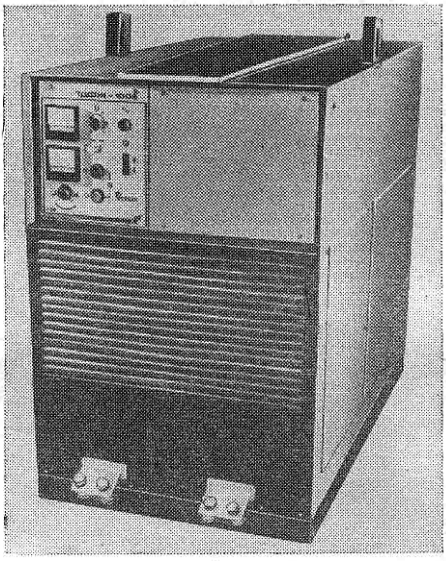


Рис. 8.37. Трансформатор ТДФЖ-1002

рованного напряжения на стабилитроне *VD2* и нестабилизированного напряжения на резисторе *R5*. Таким образом, при росте сетевого напряжения сигнал задания на потенциометре *R7* уменьшается, а при уменьшении сетевого напряжения — увеличивается. Резисторы *R8* и *R9* служат для установления минимального и максимального значений рабочего напряжения трансформатора.

Напряжение задания с потенциометра *R7* сравнивается с сигналом обратной связи по рабочему напряжению. Цепь обратной связи состоит из выпрямительного моста *VD3*, резисторов делителя напряжения обратной связи *R10*, *R11* и сглаживающего конденсатора *C6*. В полностью сформированном виде напряжение обратной связи выделяется на резисторе *R11*.

Разность между напряжениями задания и обратной связи через фильтр (резистор *R12*, конденсатор *C5*) подается на вход ФУ, принцип действия которого подробно рассмотрен в предыдущем разделе.

Уменьшение напряжения на выходных зажимах трансформатора в результате воздействия какого-либо возмущения процесса (например, уменьшение вылета электрода)

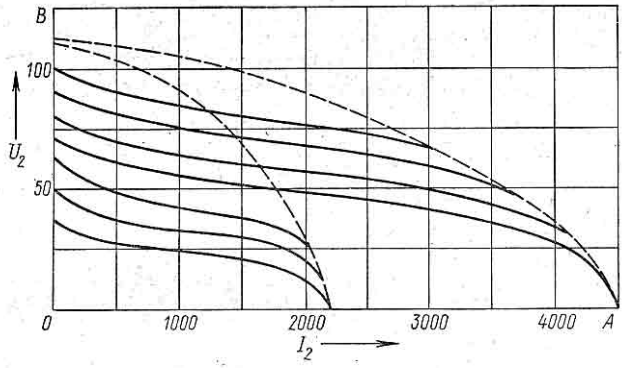


Рис. 8.38. Внешние характеристики трансформатора ТДФЖ-2002

вызывает уменьшение сигнала обратной связи. Поскольку напряжение задания не изменилось, возрастает разностный сигнал на входе ФУ. Заряд времязадающего конденсатора ФУ ускоряется, уменьшается время от начала полупериода напряжения питающей сети до момента разряда конденсатора и поступления импульсов управления на силовые тиристоры.

В результате напряжение на обмотках силового трансформатора возрастает до прежнего значения.

Трансформатор включается на сварку выключателем *K1*. При этом подается питающее напряжение на ФУ, на узел задания рабочего напряжения (обмотка *T2.3*) и на выходное устройство ФУ (обмотки *T2.4* и *T2.5*). На выходных зажимах силового трансформатора устанавливается напряжение холостого хода, соответствующее уставке потенциометра *R7*.

В случае пробоя силовых тиристоров *VS1* и *VS2* при отсутствии сварки на вторичной обмотке трансформатора появляется полное напряжение холостого хода. Для обеспечения безопасности обслуживающего персонала предусмотрена автоматическая защита. С этой целью выводы независимого расцепителя *HP* автоматического выключателя *Q1*, установленного на входе трансформатора, через размыкающий контакт магнитного пускателя *K2* подключены на выходные зажимы трансформатора, что обеспечивает практически мгновенное отключение его от сети при появлении напряжения холостого хода в процессе настроечных работ.

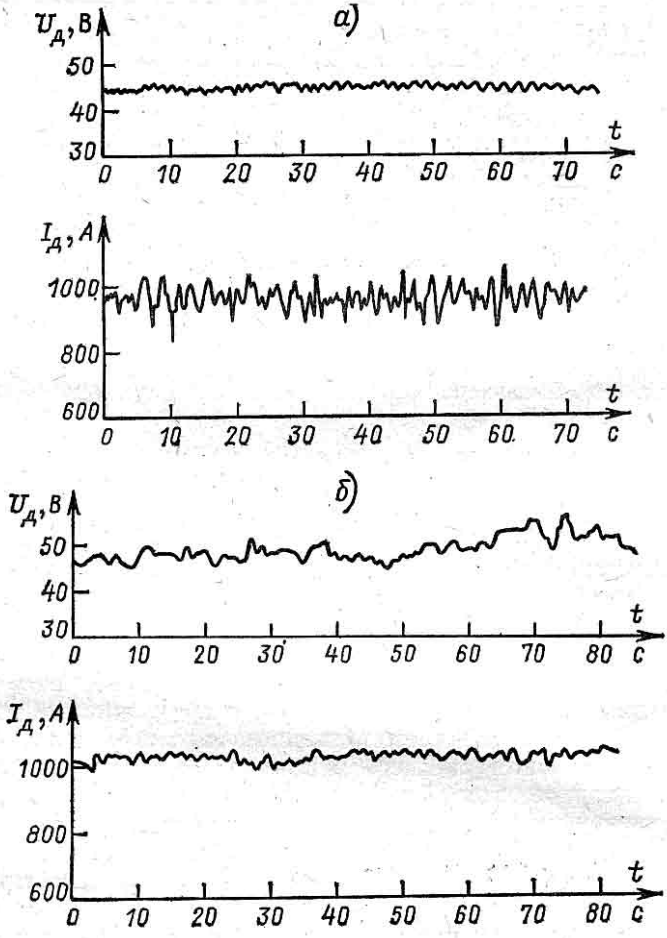


Рис. 8.39. Ток и напряжение дуги при сварке под флюсом от трансформаторов ТДФЖ-2002 (*а*) и ТДФ-1601 (*б*) в режиме 1000 А, 45 В

На рис. 8.38 приведены внешние характеристики трансформатора ТДФЖ-2002 для диапазонов больших и малых токов, штриховыми линиями обозначены предельные естественные внешние характеристики силового трансформатора для этих диапазонов. Жесткость внешних характеристик обеспечивает поддержание постоянного напряжения дуги. Значение сварочного тока определяется скоростью электродной проволоки.

Параллельность внешних характеристик трансформаторов ТДФЖ позволяет ориентировочно установить рабочее напряжение на холостом ходу трансформатора.

При замыкании электродной проволоки на изделие в момент зажигания дуги напряжение на выходе трансформатора резко падает, тиристоры фазорегулятора полностью открываются. Это означает, что независимо от режима сварки зажигание дуги всегда происходит на максимальном токе установленного диапазона. На рис. 8.39 показаны записанные самописцем ток и напряжение первой дуги трехдугового стана сварки труб большого диаметра при питании дуги от трансформаторов ТДФЖ-2002 (рис. 8.39, *а*) и ТДФ-1601 (рис. 8.39, *б*). При сварке от трансформатора ТДФЖ-2002 с жесткими внешними характеристиками процесс саморегулирования дуги протекает более активно: постоянство длины дуги обеспечивается непрерывными колебаниями сварочного тока.

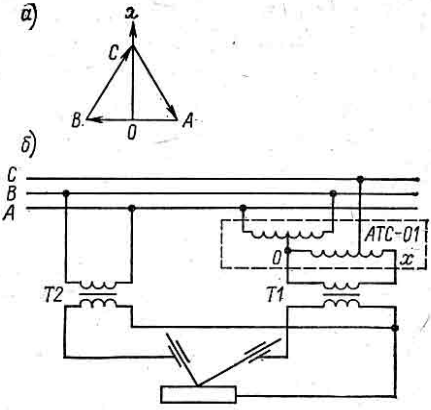


Рис. 8.40. Диаграмма напряжений на зажимах подключения автотрансформатора АТС-01 (*а*) и схема двухдуговой сварки с применением АТС-01 (*б*)

Автотрансформатор сварочный АТС-01. Автотрансформатор сварочный АТС-01 предназначен для включения сварочных трансформаторов по двухфазной симметричной схеме (схеме Скотта). Такое включение обеспечивает равномерную симметричную нагрузку трехфазной сети при питании двух дуг с одинаковым (или близким) режимом сварки и применяется при двух- или трехдуговой автоматической сварке под слоем флюса.

Принцип работы автотрансформатора АТС-01 заключается в следующем.

Одно из линейных напряжений питающей сети (например, U_{AB} на диаграмме рис. 8.40, *а*) делится на две равные части. Напряжение между точкой деления 0 и фазой *C* равно $\sqrt{3}/2\ U_{AB}$ и сдвинуто по фазе относите-

льно U_{AB} на 90° (270°). Это напряжение трансформируется до номинального значения $U_{0x} = U_{AB}$ и используется для питания сварочного трансформатора *T1* (рис. 8.40, *б*). Трансформатор *T2* включается на напряжение U_{AB}. При таком включении токи вторичных обмоток трансформатора сдвинуты на 90°, что в ряде случаев дает определенный технологический эффект.

Делитель напряжения в автотрансформаторе АТС-01 и собственно автотрансформатор выполнены на едином трехстержневом магнитопроводе. На одном из крайних стержней расположены катушки делителя напряжения, на другом — катушки автотрансформатора. Средний стержень служит для развязки магнитных потоков делителя и автотрансформатора, сечение его в $\sqrt{2}$ больше сечения крайних стержней.

Конструкция автотрансформатора АТС-01 стационарная, с естественной воздушной вентиляцией.

Технические данные (номинальные значения) автотрансформаторы приведены ниже:

Напряжение трехфазной питающей сети, В	380
Напряжение нагрузки, В, не менее	380
Ток нагрузки, А	630
Потребляемый ток, А:	
фаза *A*	375
фаза *B*	375
фаза *C*	750
Масса, кг, не более	700

8.6. ПОДКЛЮЧЕНИЕ, НАЛАДКА И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Трансформаторы для автоматической сварки типа ТДФЖ. Перед первым пуском нового трансформатора или перед пуском трансформатора, длительное время не бывшего в употреблении, а также при изменении места его установки необходимо:

очистить трансформатор от пыли, продувая его сухим сжатым воздухом;

проверить мегомметром на 500 В сопротивление изоляции между первичной цепью и корпусом, вторичной цепью и корпусом, а также между первичной и вторичной цепями трансформатора; сопротивление не должно быть ниже 2,5 МОм. В случае снижения сопротивления изо-

ляции трансформатор следует просушить внешним нагревом или продувая теплым воздухом;

проверить соответствие питающей сети первичному напряжению и току трансформатора;

поставить тумблер «Местное—дистанционное управление» на лицевой панели трансформатора в положение «Местное управление»;

переключением перемычек на панели переключения диапазонов сварочного тока установить требуемый диапазон тока и подключить трансформатор к сети. При этом в трансформаторе ТДФЖ-2002 сигнальная лампа «Сеть» должна загораться сразу же после подачи сетевого напряжения, а в трансформаторе ТДФЖ-1002 — после включения автоматического выключателя *Q1* (см. рис. 8.36). Минимальное сечение медных изолированных проводов для подключения к сети трансформатора ТДФЖ-1002 составляет 120 мм², а для ТДФЖ-2002 — 240 мм². Для питания двигателя вентилятора (на рис. 8.36 не показан) на трансформатор необходимо подать третий слаботочный питающий провод сечением 2—4 мм²;

включить автоматический выключатель цепей управления трансформатора и выключатель «Включено. Пуск». Следует обратить внимание на направление охлаждающего воздуха, который должен всасываться со стороны лицевой панели. Если воздух всасывается неправильно, ветровое реле не сработает, не произойдет блокировки выключателя «Включено. Пуск». При этом необходимо изменить фазировку питающего напряжения на входных зажимах трансформатора или на двигателе вентилятора, поменяв местами два питающих провода;

переключателем «Сварка включена» (ключ *K1* на рис. 8.36) включить трансформатор на сварку. Постепенно поворачивая по часовой стрелке ручку потенциометра *R7*, установленного на лицевой панели трансформатора, убедиться в плавном нарастании напряжения холостого хода до максимального значения, которое составляет 110—120 В. Ровное, несильное гудение трансформатора начинается с напряжения холостого хода 80—90 В и свидетельствует о его нормальной работе.

При отсутствии напряжения холостого хода или при повышенном гудении трансформатора при повороте ручки потенциометра *R7* необходимо отключить трансформатор от сети, снять слаботочный провод питания вентилятора, отключить двигатель вентилятора, подключить транс-

форматор к сети двумя силовыми проводами. Включить автоматические выключатели. При отсутствии напряжения холостого хода проконтролировать напряжения на вторичных обмотках трансформатора *Т2*, на задающем потенциометре *R7* и резисторах цепей управления силовыми тиристорами *R13* и *R14*. Наличие плавно регулируемого напряжения на резисторах *R13* и *R14* свидетельствует о нормальной работе схемы фазового управления; для устранения неисправности надо поменять местами провода, подключенные к первичной обмотке трансформатора *Т2*.

Повышенное гудение трансформатора при повороте ручки потенциометра *R7* свидетельствует о том, что работает только один из силовых тиристоров. При этом трансформатор оказывается включенным на питание постоянным током и происходит резкое нарастание намагничивающего тока в его первичной обмотке. Необходимо определить, какой из тиристоров не включается, для чего следует поочередно разрывать цепь управления тиристорами *VS1* и *VS2* (например, отпаяв резистор *R13*, а затем *R14*). Если в цепи управления неработающего тиристора обрыва не обнаружено, изменить фазу обмотки питания цепи управления данного тиристора (обмотка *Т2.4* или *Т2.5*), поменяв местами провода, подключенные к обмотке, или изменить полярность управляющего импульса на силовом тиристоре. «Плюс» управляющего импульса должен быть подключен к управляющему электроду тиристора, а «минус» — к катоду.

Необходимо помнить, что силовые тиристоры, резисторы *R13*, *R14* и обмотки *Т2.4* и *Т2.5* трансформатора *Т2* **находятся под напряжением сети.**

Дальнейшая проверка работоспособности трансформатора заключается в следующем:

отключить трансформатор от сети;

подключить двигатель вентилятора;

подключить третий (слаботочный) провод питающей сети, подать напряжение на трансформатор;

проверить напряжение холостого хода;

отключить трансформатор выключателем *Q1*, замкнуть его выходные зажимы накоротко проводом достаточно большого сечения (120 или 185 мм^2). Включить трансформатор, предварительно установив ручку потенциометра *R7* в положение, соответствующее минимальному рабочему напряжению. Проверить, не допуская перегрева коротко-

замыкающего провода, регулирование сварочного тока, работу амперметра на лицевой панели трансформатора;

отключить трансформатор от сети, замкнуть накоротко тиристоры *VS1* и *VS2* проводом сечения не менее 10 мм², поставив выключатель *K1* «Сварка» в положение «Выключено». Подключить трансформатор к сети. При этом при подаче питающего напряжения автоматический выключатель *Q1* должен отключить трансформатор от сети.

Исправный трансформатор можно подключить к сварочному автомату. Работу по настройке автомата следует производить при выключенной кнопке «Сварка», установленной на сварочном автомате (при дистанционном управлении), или выключенном переключателе «Сварка» на лицевой панели трансформатора (при местном управлении).

При выборе диапазона сварочного тока следует отдавать предпочтение наименьшему диапазону, обеспечивающему заданный режим сварки. Ниже приведены примеры правильного выбора диапазона.

Пример 8.3. Режим сварки: $I_д = 750$ А; $U_д = 36$ В. Нормальный процесс сварки обеспечивают оба диапазона токов трансформатора ТДФЖ-1002, однако следует выбрать диапазон малых токов, при котором будет меньший коэффициент формы тока (меньшее отклонение формы сварочного тока от синусоидальной).

Пример 8.4. Режим сварки: $I_д = 1800$ А; $U_д = 55$ В. Выбираем диапазон средних токов трансформатора ТДФЖ-2002. При больших падениях напряжения в сварочных проводах и пониженном напряжении питающей сети, не позволяющих уверенно поддерживать требуемое напряжение дуги, следует переключить трансформатор на диапазон больших токов.

Трансформаторы для ручной электродуговой сварки. Перед началом эксплуатации новый трансформатор необходимо расконсервировать, снять смазку, продуть его сухим сжатым воздухом, проверить, нет ли видимых повреждений и не ослаблен ли крепеж после транспортировки. Перед первым пуском нового трансформатора или перед пуском трансформатора, длительное время не бывшего в употреблении, а также при изменении места установки трансформатора необходимо:

очистить трансформатор от пыли, продувая его сухим сжатым воздухом;

проверить мегомметром на 500 В сопротивление изоляции между первичной обмоткой и корпусом, предварительно отключив фильтр для подавления радиопомех от земли, между вторичной обмоткой и корпусом и между первичной и вторичной обмотками; сопротивление изо-

Таблица 8.7

Тип трансформатора	Напряжение сети, В	Первичный ток, А	Номинальное сечение провода, мм²				
			первичной цепи	вторичной цепи при сварном токе, А			
				500	400	300	125
ТДМ-317 или ТДМ-317-1	220 380	97 56	16 10	—		50	25
ТДМ-401 или ТДМ-401-1	220 380	124 73	16 10	—	70	50	25
ТДМ-503 или ТДМ-503-1	220 380	155 90	25 10	95	70	50	25
ТДМ-503-2 или ТДМ-503-3	380	65	10	95	70	50	25

ляции должно быть не ниже 10 МОм. В случае снижения сопротивления изоляции трансформатор следует просушить внешним нагревом, обдувая теплым воздухом, при этом температура обмоток должна быть не выше 100 °С;

выполнить кабелем соответствующего сечения (табл. 8.7) все соединения и тщательно затянуть все контактные зажимы;

заземлить надежно корпус трансформатора. Для этого на корпусе имеется болт с надписью (знаком) «Земля». Запрещается пользоваться заземлением одного трансформатора для заземления другого;

заземлить зажим вторичной обмотки трансформатора, к которому подключается провод, идущий к изделию (обратный провод); также должен быть заземлен сварочный стол (плита);

помнить, что включать трансформатор без заземления недопустимо. При работе трансформатора возможно нарушение изоляции обмоток относительно корпуса или между первичной и вторичной обмотками, и в случае отсутствия заземления при касании корпуса или зажима вторичной обмотки человек может оказаться под напряжением, опасным для жизни;

убедиться, что концы рабочего кабеля не касаются один другого, присоединенный электрододержатель и конец второго рабочего провода не касаются одновременно металлической поверхности;

Таблица 8.8

Толщина свариваемого материала, мм	Диаметр электрода, мм	Сила сварочного тока, А	Толщина свариваемого материала, мм	Диаметр электрода, мм	Сила сварочного тока, А
2	2	65—100	8—10	4	160—210
3	3	100—120		5	200—270
				6	250—320
4—5	3	100—120	10—14	5	200—270
	4	160—210		6	250—320
5—8	4	160—210	15—20	6	250—320
	5	200—270		8	320—450

поставить переключатель диапазона токов на необходимый диапазон в соответствии с выбранным режимом сварки (табл. 8.8), рукоятку переключателя переводить из одного крайнего положения в другое обязательно рывком до упора;

проверить соответствие напряжения сети напряжению, указанному на заводской табличке трансформатора;

подключить сварочный трансформатор к сети через рубильник и предохранители.

Рекомендуемые сечения медных изолированных проводов, подключающих трансформатор к сети, а также сечение сварочных проводов для трансформатора приведены в табл. 8.7.

Для ориентировочного подбора сварочного режима в зависимости от толщины свариваемого материала и соответствующего размера электрода можно пользоваться данными табл. 8.8. Руководствуясь собственным опытом или справочным материалом по производству сварочных работ, сварщик может выбрать значение тока более точно.

Для обеспечения бесперебойной длительной работы трансформатора надо производить его техническое обслуживание, ежедневные и периодические осмотры.

При ежедневном обслуживании необходимо:

перед началом работы производить внешний осмотр трансформатора для выявления случайных повреждений отдельных наружных частей и устранять замеченные недостатки;

проверять заземление трансформатора.

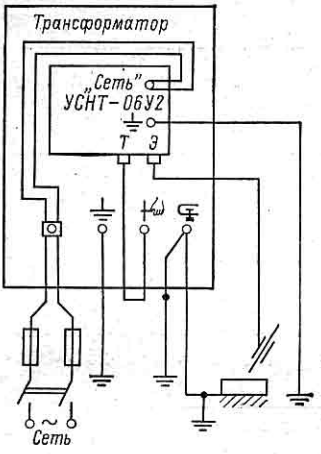


Рис. 8.41. Подключение ограничителя УСНТ-06У2 к сварочному трансформатору

При периодическом обслуживании необходимо:

а) один раз в месяц:

очистить трансформатор от пыли и грязи, продув его сжатым воздухом, а в доступных местах протереть чистой мягкой ветошью;

проверить состояние электрических контактов с целью обеспечения надежного электрического контакта;

б) один раз в три месяца:

проверить состояние конденсатора фильтра защиты от радиопомех; наружным осмотром установить отсутствие механических повреждений конденсаторов; в случае присоединения новых конденсаторов взамен вышедших из строя зачистить места контактов, тщательно затянуть винтовые соединения;

проверить сопротивление изоляции;

в) один раз в шесть месяцев:

очистить контакты и изоляционные части переключателя диапазона тока от медной пыли и налета. Для более легкого перевода рукоятки из одного крайнего положения в другое и предохранения контактных поверхностей от задиров смазать контатные поверхности тугоплавкой смазкой ЦИАТИМ-201;

смазать тугоплавкой смазкой УТ-1 все трущиеся части (трущиеся поверхности ходового винта, переключателя, поверхности магнитопровода в местах скольжения плоских пружин подвижных катушек, посадочные поверхности осей колес).

При проведении ручной дуговой сварки на открытом воздухе, в особо опасных помещениях, в особо опасных условиях работы (внутри металлических емкостей, в колодцах, туннелях и т. п., а также в неудобной позе или лежа) для обеспечения безопасности при смене электродов трансформатор должен иметь ограничитель холостого хода, снижающий напряжение холостого хода на выходных зажимах сварочной цепи до значения, не превышающего 12 В, не позже чем через 1 с после погасания сварочной

дуги. Наша промышленность выпускает в настоящее время ограничитель холостого хода типа УСНТ-06У2, который навешивается на лицевую панель трансформаторов ТДМ. На рис. 8.41 показано подсоединение ограничителя УСНТ-06У2 к сварочному трансформатору.

Применение ограничителя УСНТ-06У2 не освобождает от полного соблюдения правил технической эксплуатации и техники безопасности при производстве электросварочных работ.

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

ВЫПРЯМИТЕЛИ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ

9.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Большой прогресс, достигнутый в области производства полупроводниковых вентилей (тиристоров) на значительные напряжения и токи, привел к разработке и широкому распространению однопостовых и многопостовых выпрямителей для всех видов дуговой сварки. Сварочные выпрямители обладают значительными преимуществами перед электромашинными преобразователями: высокими сварочными качествами за счет повышения стабильности горения дуги и уменьшения разбрызгивания металла; высоким КПД и меньшими потерями холостого хода, что особенно важно для источников питания, работающих с низкими ПН (ПВ); широкими пределами регулирования тока и напряжения; возможностью автоматизации и программирования сварочного процесса; меньшими массой и габаритами; отсутствием вращающихся частей и потребности в фундаментах для установки выпрямителей на большие токи. В настоящее время выпускаются как однопостовые, так и многопостовые выпрямители.

Однопостовые выпрямители могут быть разделены на следующие группы:

с падающими внешними характеристиками для ручной дуговой сварки штучными электродами и механизированной сварки под флюсом;

с жесткими внешними характеристиками для механизированной сварки плавящимся электродом в защитных газах;

с универсальными внешними характеристиками, крутопадающими и жесткими, для всех видов сварки.

Многопостовые сварочные выпрямители также разделяются на группы:

с падающими внешними характеристиками сварочного поста для ручной дуговой сварки плавящимся электродом;

с жесткими внешними характеристиками сварочного поста для механизированной сварки плавящимся электродом и в углекислом газе;

с универсальными, крутопадающими и жесткими, внешними характеристиками.

Выпускаемые выпрямители имеют различные системы регулирования тока и напряжения. Наибольшее распространение получили механическое регулирование, регулирование дросселями насыщения, тиристорное, ступенчатое за счет изменения коэффициента трансформации силового трансформатора и балластными реостатами.

9.2. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ВЕНТИЛИ И ОСОБЕННОСТИ ИХ РАБОТЫ В СВАРОЧНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЯХ

В сварочных выпрямителях применяются следующие силовые кремниевые вентили: неуправляемые вентили—диоды и управляемые вентили—тиристоры. Выпрямительный блок источников питания работает в тяжелых условиях, постоянно подвергаясь переменным воздействиям электрических, тепловых и механических факторов. При расчете и экспериментальной проверке блока необходимо проверить соответствие его параметров информационным материалам на диоды и тиристоры при всех возможных режимах работы.

Основные параметры вентилей, подлежащие расчету и проверке:

температура перехода вентиля при номинальном длительном режиме работы $T_{п}$, при циклических нагрузках, а также при технологических и аварийных перегрузках. К технологическим перегрузкам относится режим возбуждения дуги, к аварийным режимам — глухое короткое замыкание на выводах выпрямителя, внутренние короткие замыкания. Во всех случаях не должна превышаться максимально допустимая температура перехода прибора. Например, для диодов серии В $T_{п\,max} = 140$ °С, для тиристоров серии Т $T_{п\,max} = 125$ °С;

повторяющиеся и неповторяющиеся переходные напряжения, прикладываемые к вентилю в обратном или прямом закрытом направлениях. К повторяющимся напряжениям относятся, например, перенапряжения, возникающие при восстановлении запирающих свойств вентилей; к неповторяющимся — напряжения, возникающие при включении и выключении силового трансформатора сварочного выпрямителя, обрыве сварочного тока и повторных возбуждениях дуги.

Контролируемым параметром для тиристоров является также критическая скорость нарастания прямого напряжения и прямого тока. Исходными данными для расчета служат назначение и мощность сварочного выпрямителя, схема выпрямителя, тип выбранного вентиля, условия его охлаждения.

Выбор допустимых нагрузок по току при длительных нагрузках, технологических и аварийных перегрузках. Температура перехода $T_п$ связана с мощностью потерь, рассеиваемой в вентиле, $P_в$ и общим установившимся тепловым сопротивлением вентиля $R_т$ зависимостью

$$T_п = P_в R_т + T_{окр},$$

где $T_{окр}$ — температура окружающей среды; $R_т = R_{т.\,п-к} + R_{т.\,к-о} + R_{т.\,о-х}$; $R_{т.\,п-к}$ — установившееся тепловое сопротивление «переход—корпус»; $R_{т.\,к-о}$ — установившееся тепловое сопротивление контакта «прибор—охладитель»; $R_{т.\,о-х}$ — установившееся тепловое сопротивление «охладитель—среда».

Температура перехода в неустановившемся тепловом режиме определяется с помощью переходного теплового полного сопротивления Z_t. Значение Z_t является суммой тех же слагаемых, что и $R_т$. Величины $R_т$ и Z_t зависят от условий охлаждения прибора.

Мощность потерь в вентиле при низких частотах можно представить в виде

$$P_в = 1{,}025 P_{осн},$$

где $P_{осн}$ — потери от прохождения прямого тока; 1,025 — коэффициент, учитывающий наличие добавочных потерь.

Основные потери

$$P_{осн} = U_п I_{в.ср} + k_ф^2 r_д I_{в.ср}^2,$$

Таблица 9.1

Угол проводимости, ...°	Коэффициент $k_ф$ при форме тока	
	синусоидальной	прямоугольной
Постоянный ток	1	1
180	1,57	1,41
120	1,87	1,73
90	2,22	2,0
60	2,77	2,46
30	3,99	3,46

где $U_п$ — пороговое напряжение; $r_д$ — дифференциальное сопротивление вентиля; $I_{в.ср}$ — средний ток через вентиль; $k_ф$ — коэффициент формы тока вентиля.

Средний ток через вентиль

$$I_{в.ср} = k_а I_d/m,$$

где I_d — выпрямленный ток выпрямителя; m — число фаз выпрямителя; $k_а = 1{,}05 \ldots 1{,}15$ — коэффициент асимметрии загрузки вентилей.

В зависимости от угла проводимости вентиля и формы тока через него коэффициент $k_ф$ может быть определен по табл. 9.1.

Например, у выпрямителя с падающими характеристиками, собранного по трехфазной мостовой схеме выпрямления, угол проводимости составляет в рабочем режиме 180°, а $k_ф = 1{,}57$.

Для предварительных расчетов потерь в вентилях при номинальном токе выпрямителя, особенно при наличии индуктивности в сварочной цепи, коэффициент формы тока может быть определен по формуле

$$k_ф = \sqrt{m}.$$

В режимах технологических и особенно аварийных перегрузок $k_ф$ следует определять с учетом угла коммутации γ. В этом случае

$$k_ф = 1{,}05 \sqrt{\frac{2\pi}{2\pi/m + \gamma}}.$$

Угол γ может быть определен из уравнения коммутации

$$\cos\alpha - \cos(\alpha + \gamma) \frac{X_ф I_d}{U_{лm} \sin \frac{\pi}{m}},$$

где $X_ф$ — индуктивное сопротивление фазы трансформатора питания; $U_{лm}$ — амплитудное значение линейного напряжения трансформатора питания; α — угол регулирования выпрямителя.

Для режимов перегрузок α можно принять равным нулю. В случае если импульсы мощности имеют прямоугольную или близкую к ней форму, следует считать

$$k_{\Phi} = \sqrt{Q},$$

где $Q = t_{\text{ц}}/t_{\text{р}}$ — коэффициент скважности, а $t_{\text{ц}}$ и $t_{\text{р}}$ — соответственно время цикла и работы в общем цикле.

В отдельных случаях для упрощения расчета импульсы мощности потерь, повторяющиеся с определенной частотой и имеющие произвольную форму, могут быть заменены эквивалентными импульсами прямоугольной формы. При этом высота прямоугольных импульсов должна быть равна амплитуде заменяемых.

На основе приведенных соотношений может быть определена температура перехода в длительных режимах и при перегрузках. Возможно решение и обратной задачи, при которой на основании допустимой максимальной температуры перехода $T_{\text{п max}}$ находятся допустимые потери в вентиле $P_{\text{в. доп}}$ и граничное значение тока через вентиль $I_{\text{в. гр}}$ с учетом температуры окружающей среды $T_{\text{окр}}$:

$$P_{\text{в. доп}} = \frac{T_{\text{п max}} - T_{\text{окр}}}{1{,}025R_{\text{т}}};$$

$$I_{\text{в. гр}} = \frac{\sqrt{U_{\text{п}}^2 + 4k_{\Phi}^2 r_{\text{д}} P_{\text{в.доп}}} - U_{\text{п}}}{2k_{\Phi}^2 r_{\text{д}}}.$$

Расчет температуры перехода вентиля $T_{\text{п}}$ при ступенчатом изменении нагрузки, например при кратковременном (около 1 с) возбуждении дуги вслед за окончанием рабочего режима или режима холостого хода, а также при аварийном режиме может быть произведен по формуле

$$T_{\text{п}} = T_{\text{п1}} + (P_{\text{в2}} - P_{\text{в1}})\, Z_t,$$

где $T_{\text{п1}}$ — температура перехода в предшествующем режиме работы; $P_{\text{в1}}$, $P_{\text{в2}}$ — мощность потерь в вентиле в предыдущем и последующем режимах работы; Z_t — переходное тепловое полное сопротивление, определяемое от момента изменения нагрузки (0) до ее окончания.

Значения $U_{\text{п}}$, $r_{\text{д}}$, $R_{\text{т}}$, Z_t приводятся в литературе в зависимости от типа вентиля (тиристора), условий охлаждения, конструкции охладителя.

Нагрев вентилей при повторно-кратковременной нагрузке и проверка циклической устойчивости вентилей. В условиях эксплуатации большинство сварочных вентилей работают в повторно-кратковременных режимах с циклическим изменением температуры структуры. При этом в вентилях может иметь место нарушение кремниевых структур. Для расчета циклической устойчивости вентилей необходимо знать температуру их перехода при работе под нагрузкой и на холостом ходу.

Максимальная температура перехода

$$T_{\text{п max}} = P_{\text{в}} [Q^{-1} R_{\text{т}} + (1 - Q^{-1}) Z_{t1} - Z_{t2} + Z_{t3}],$$

где Q — коэффициент скважности; Z_{t1}, Z_{t2}, Z_{t3} — переходные тепловые сопротивления в моменты времени $(t_{\text{п}} + t_{\text{р}})$, $t_{\text{п}}$, $t_{\text{р}}$.

Минимальная температура перехода

$$T_{\text{п min}} = P_{\text{в}} [Q^{-1} R_{\text{т}} + (1 - Q^{-1}) Z_{t2} - Z_{t3}].$$

Диапазон колебаний температуры $\Delta T = T_{\text{п max}} - T_{\text{п min}}$.

Зависимость граничного числа циклов n от перепада температуры приводится в каталогах по типам вентилей. Например, для таблеточных тиристоров серии $Т$ по данным завода-изготовителя $n = n_0 \Delta T^{-\alpha}$, где $n_0 = 200 \times 10^6$; $\alpha = 2$ при $T_{\text{п max}} > 69$ °С и $T_{\text{п min}} > 69$ °С; $n_0 = 130 \cdot 10^{13}$; $\alpha = 5$ при $T_{\text{п max}} > 69$ °С и $T_{\text{п min}} < 69$ °С.

При расчете реального числа циклов работы выпрямителя за его срок службы надо учитывать, что выпрямитель работает при номинальной нагрузке неполное время.

Выбор допустимых нагрузок на вентили по напряжению. Предварительный выбор класса вентиля производится исходя из амплитудного значения обратного напряжения на вентиле $U_{\text{вт}}$ при заданном выпрямленном напряжении выпрямителя на холостом ходу $U_{\text{х. х}}$ без учета перенапряжений.

Известно, что $U_{\text{вт}} = 1{,}045 U_{\text{х. х}}$ для трехфазной мостовой схемы выпрямителя и $U_{\text{вт}} = 2{,}09 U_{\text{х. х}}$ для шестифазных схем с уравнительным реактором и кольцевой. Значение $U_{\text{вт}}$ является рекомендуемым рабочим напряжением вентиля $U_{\text{р}}$, по которому рассчитывается повторяющееся рабочее напряжение вентиля $U_{\text{повт}} = 0{,}8 U_{\text{р}}$ и его класс. Однако, учитывая возможные перенапряжения, класс вентиля следует брать в 1,5—2 раза больше расчетного.

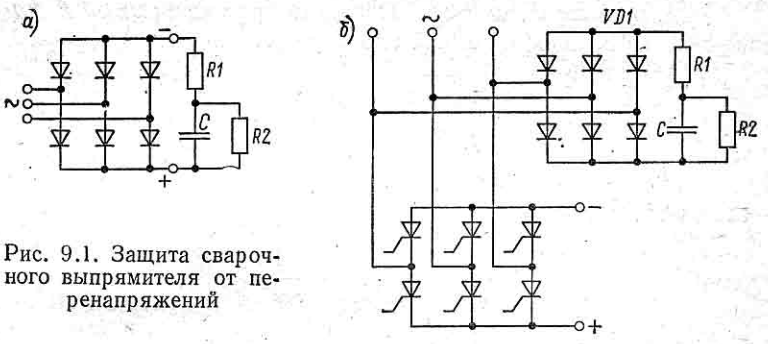


Рис. 9.1. Защита сварочного выпрямителя от перенапряжений

Вентильный блок сварочного выпрямителя необходимо защищать от перенапряжений цепочками *RC*. На рис. 9.1, *а* приведена рекомендуемая цепочка *R1C*, подключаемая при неуправляемых выпрямителях на зажимы цепи выпрямленного напряжения. При тиристорных выпрямителях аналогичная цепочка подключается ко вторичным обмоткам трансформатора через вспомогательный выпрямительный блок *VD1*, как показано на рис. 9.1, *б*. Сопротивление резистора *R2* является разрядным. Параметры конденсатора *C* и резисторов *R1* и *R2* определяются следующим образом:

а) емкость конденсатора (в фарадах) для защиты от перенапряжений, возникающих в момент отключения трехфазного силового трансформатора,

$$C = \frac{2}{3}\frac{\varepsilon S_т k_{нмг}^2 k_\omega}{\omega U_{нп}^2},$$

где $\varepsilon = I_{нмг}/I_{ном}$ — относительное значение намагничивающего тока; $I_{нмг}$ — действующее значение намагничивающего тока, А; $I_{ном}$ — номинальный ток первичной обмотки трансформатора, А; $S_т$ — мощность трансформатора, В·А; $k_{нмг}$ — отношение амплитудного значения намагничивающего тока к действующему значению, равное 1,41—2,0; ω — угловая частота напряжения питающей сети, рад/с; $U_{нп}$ — неповторяющееся напряжение для полупроводникового диода; В: $U_{нп} = 1{,}12U_{повт}$; k_ω — коэффициент, учитывающий рассеяние электромагнитной энергии, запасенной в индуктивных элементах трансформатора, в дуге, возникающей при обрыве тока: $k_\omega = 0{,}5$;

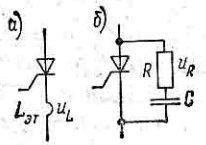


Рис. 9.2. Схемы для измерения скорости нарастания прямого напряжения на тиристоре du/dt и прямого тока di/dt

б) емкость конденсатора для защиты от перенапряжений, возникающих при обрыве сварочного тока,

$$C = \frac{2}{3} \frac{e_к S_т k_п^2 k_\omega}{\omega (U_{нп} - U_р)^2},$$

где $e_к$ — напряжение короткого замыкания трансформатора (относительное значение); $k_п$ — отношение фактической амплитуды тока нагрузки в момент обрыва тока к номинальному действующему значению тока вторичной обмотки трехфазного силового трансформатора (перегрузка); $U_р$ — амплитуда рабочего переменного напряжения на вентиле, В.

Значение емкости выбирается большее из обоих полученных выражений.

Величина R_1 определяется согласно выражению

$$R_1 \leqslant \frac{U_{нп} - U_р}{k_п I_{ном}}.$$

Шунтирующее сопротивление предварительно определяется из выражения $R_2 \approx t_р/C$, где $t_р$ — постоянная разряда конденсатора C ($t_р = 10^{-1}$ С). Указанная цепочка RC одновременно ограничивает и коммутационные напряжения на вентилях.

Определение скорости нарастания прямого напряжения на тиристоре и прямого тока через тиристор. Для измерения скорости нарастания прямого напряжения на тиристоре du/dt следует пользоваться схемой на рис. 9.2, *а*, а для измерения скорости нарастания прямого тока — схемой на рис. 9.2, *б*. Сигнал снимается с безындуктивного резистора R (u_R) или эталонной катушки индуктивности $L_{эт}$ (u_L) на осциллограф и фотографируется, при этом

$$\frac{du}{dt} = \frac{u_R}{RC}, \quad \text{а} \quad \frac{di}{dt} = \frac{u_L}{L}.$$

Для работы со сварочными выпрямителями на 300—1600 А рекомендуются следующие параметры элементов схем на рис. 9.2: $R = 1000$ Ом; $C = 0{,}01$ мкФ; $L = 0{,}5 \times \times 10^{-6}$ Гн.

9.3. СХЕМЫ ВЫПРЯМЛЕНИЯ

Подавляющее большинство выпрямителей для дуговой сварки как с падающими, так и с жесткими внешними характеристиками выпускается с питанием от трехфазной сети и соответственно с применением трехфазных и шестифазных схем выпрямления.

Многофазное выпрямление обеспечивает равномерную нагрузку питающей сети, лучшее использование вентилей, активных материалов трансформатора и дросселей, а также меньшую пульсацию выходного напряжения и тока, что особенно важно для выпрямителей с тиристорным регулированием.

В настоящее время в сварочных выпрямителях получили распространение трехфазная мостовая и шестифазные схемы выпрямления. Из шестифазных схем применяются двойная трехфазная схема с уравнительным реактором, кольцевая и простая шестифазная схема с нулевой точкой. Применение шестифазных схем выпрямления вызвано стремлением к значительно лучшему использованию вентилей по току (практически в два раза), несмотря на усложнение конструкции трансформатора, введение в отдельных схемах дополнительного элемента (уравнительного реактора) и использование вентилей и тиристоров более высокого класса.

Основными параметрами и соотношениями, характеризующими схему выпрямления применительно к сварочным выпрямителям, являются:

действующее значение фазного (линейного) вторичного напряжения трансформатора $U_{2ф}$ ($U_{2л}$) в зависимости от напряжения холостого хода выпрямителя $U_{х.\,х}$;

амплитудное значение обратного напряжения на вентиле $U_{обр\,m}$;

действующее значение фазного (линейного) тока вторичных обмоток трансформатора I_2 в зависимости от номинального выпрямленного тока I_d с учетом работы вентилей и угла коммутации;

среднее значение выпрямленного тока через вентиль $I_{в.\,ср}$;

действующее $I_в$ и максимальное $I_{вm}$ значения тока через вентиль;

действующее значение тока первичной обмотки I_1;

расчетные мощности первичных P_1 и вторичных P_2 обмоток трансформатора, определяемые напряжением холостого хода выпрямителя и током нагрузки;

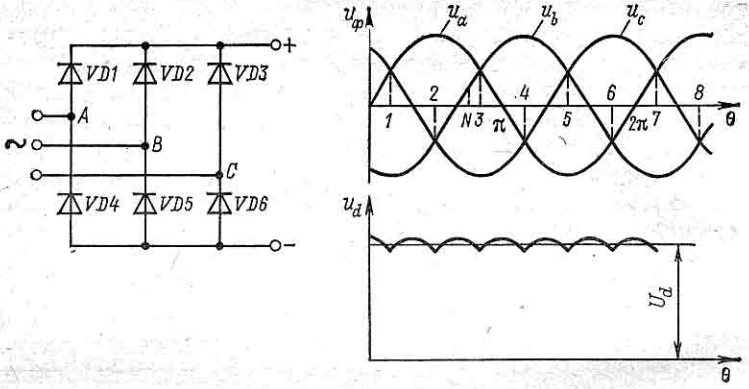


Рис. 9.3. Трехфазная мостовая схема выпрямления

расчетная мощность всего трансформатора $P_т = (P_1 + P_2)/2$.

Среднее, действующее и максимальное значения тока через вентиль определяют потери в вентилях, коэффициент формы, а также характеризуют работу вентильного блока в режимах короткого замыкания. Расчетная мощность обмоток и всего трансформатора определяет максимальную пропускную способность трансформатора при синусоидальных токах в его обмотках и характеризует расход его активных материалов.

Рассмотрим некоторые особенности применяемых схем выпрямления.

Трехфазная мостовая схема выпрямления. Это наиболее распространенная схема в выпрямителях с жесткими и падающими внешними характеристиками, особенно, когда регулирование тока и напряжения осуществляется системами регулирования без применения тиристоров. Схема обеспечивает простую конструкцию трансформатора, состоящего из трех первичных и соответственно трех вторичных обмоток, и наиболее эффективное его использование. Обмотки трансформатора могут включаться треугольником или звездой.

На рис. 9.3 приведена трехфазная мостовая схема выпрямления. Рассмотрим схему в варианте выпрямителя с жесткими внешними характеристиками (трансформатор имеет малое индуктивное сопротивление короткого замыкания) при работе на активно-индуктивную нагрузку. Следует отметить, что режимы работы на активную и ак-

тивно-индуктивную нагрузку отличаются незначительно. Как видно из рис. 9.3, в точке *1* включается вентиль *VD1*, как имеющий наибольший положительный потенциал из всех вентилей катодной группы по отношению к нулевой точке сетевого напряжения трансформатора; с ним в паре работает вентиль *VD5* фазы *B*, имеющий наибольший отрицательный потенциал из всех вентилей анодной группы. В точке *2* происходит коммутация тока в вентилях анодной группы — включается вентиль *VD6* фазы *C*. В точке *3* происходит коммутация тока в вентилях катодной группы — включается вентиль *VD2* фазы *B* и т. д. Коммутация с одного вентиля на другой происходит в моменты пересечения синусоид фазных напряжений вторичной обмотки трансформатора. Таким образом, при отсутствии индуктивного сопротивления в анодных цепях вентилей они работают попарно с углом проводимости $2\pi/3$. В действительности из-за наличия некоторой индуктивности в контуре коммутации угол проводимости больше, чем $2\pi/3$, на угол коммутации γ и работа вентилей происходит попарно и и по три. Выпрямленное напряжение (мгновенное значение) определяется линейным напряжением, которое через работающие в данный момент вентили подается на выходные зажимы выпрямителя. Например, в точке *N* напряжение $U_d = U_{AC}$.

Пульсация выпрямленного напряжения — шестифазная с частотой 300 Гц. Длительность анодных токов без учета коммутационных участков 120°. Среднее значение выпрямленного напряжения при холостом ходе выпрямителя определяется по формуле

$$U_{\text{х. х}} = \frac{3}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} \sqrt{6}\, U_{2\text{ф}} \cos\theta d\theta = 2{,}34 U_{2\text{ф}} = 1{,}35 U_{2\text{л}}.$$

Обратное напряжение на вентиле определяется амплитудой линейного напряжения вторичной обмотки:

$$U_{\text{обр}\, m} = 2{,}45 U_{2\text{ф}} = 1{,}41 U_{2\text{л}} = 1{,}045 U_{\text{х.х}}.$$

Действующие значения вторичного и первичного токов, которые в этой схеме (при коэффициенте трансформации, равном 1) равны между собой, могут быть приняты

$$I_1 = I_2 = \sqrt{2/3}\, I_d,$$

где I_d — выпрямленный ток выпрямителя.

В выпрямителях с падающими внешними характеристиками, имеющих значительное индуктивное сопротивление в анодных цепях вентилей, например в случае использования трансформаторов с подвижными катушками, вентили в диапазоне $0 \leqslant U_д/U_{х.х} \leqslant 0{,}7$ работают на сварочную дугу одновременно по три с углом проводимости, близким к π. В этом случае значения I_2 и I_1 снижаются и равны:

$$I_1 = I_2 = 0{,}745 I_d.$$

Среднее значение тока через вентиль

$$I_{в.ср} = I_d/3.$$

Максимальное значение тока

$$I_{вт} = 3{,}14 I_{в.ср}.$$

Действующее значение тока в вентиле:

$I_в = 1{,}73 I_{в.ср}$ — при жестких внешних характеристиках выпрямителя;

$I_в = 1{,}57 I_{в.ср}$ — при падающих внешних характеристиках.

Соответственно $k_ф = 1{,}76$ и $1{,}57$.

Расчетная мощность трансформатора:

$P_{т.ж.х} = 3U_{2ф}I_2 = 1{,}05 I_d U_{х.х}$ — при жестких внешних характеристиках;

$P_{т.п.х} = 0{,}95 I_d U_{х.х}$ — при падающих характеристиках.

При работе управляемого тиристорного выпрямителя угол регулирования α отсчитывается от точки естественной коммутации (точка перехода тока с вентиля одной фазы на вентиль другой фазы для неуправляемого выпрямителя).

Тиристорные сварочные выпрямители, как будет показано далее, независимо от вида внешних характеристик выполняются с применением трансформаторов, имеющих незначительное индуктивное сопротивление рассеяния. В этом случае при работе на активную нагрузку выпрямленный ток I_d является непрерывным при $\alpha \leqslant 60°$ и прерывистым при $\alpha > 60°$:

$$U_{х.х\alpha} = 2{,}34 U_{2ф} \cos\alpha = U_{х.х} \cos\alpha \text{ при } \alpha \leqslant 60°;$$

$$U_{х.х\alpha} = U_{х.х}[1 + \cos(\pi/3 + \alpha)] \text{ при } \alpha > 60°,$$

где $U_{х.х\alpha}$ — напряжение холостого хода при заданном угле регулирования.

Тиристорные выпрямители имеют специальный дроссель для сглаживания формы выпрямленного тока, в этом

случае выпрямленное напряжение определяется по формуле

$$U_d = 2{,}34U_{2\phi}\cos\alpha.$$

Для обеспечения нормальной работы выпрямителя ширина управляющих импульсов, подаваемых на тиристоры, должна быть не менее 60°. Возможна также подача двух управляющих импульсов, сдвинутых между собой на 60°, при ширине импульса 25—30°.

Цепи управления тиристоров анодной группы должны иметь гальваническую развязку.

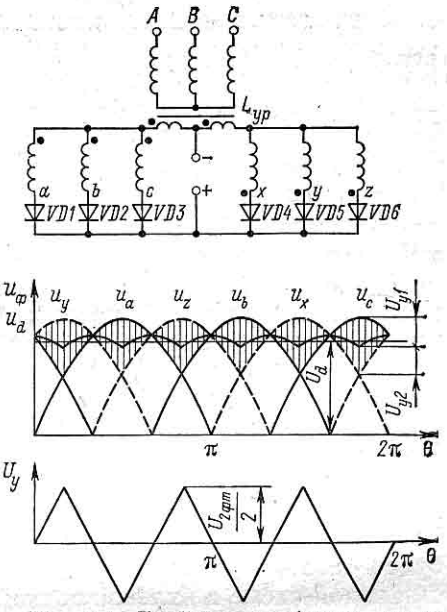


Рис. 9.4. Двойная трехфазная схема с уравнительным реактором

Двойная трехфазная схема с уравнительным реактором. Наибольшее распространение эта схема нашла в тиристорных сварочных выпрямителях на токи до 500 А. По сравнению с другими шестифазными схемами выпрямления она обеспечивает наиболее эффективное использование вентилей (наименьшие потери, наибольшая нагрузочная способность, минимальные $I_{в\,max}$ и $k_ф$). Трансформатор в таком выпрямителе имеет шесть вторичных обмоток, образующих две трехфазные группы, каждая из которых соединена в звезду; ЭДС соответствующих фаз сдвинуты на 180°. Обе группы соединены между собой уравнительным реактором, обеспечивающим их параллельную работу за счет выравнивания напряжения между ними. Уравнительный реактор представляет собой дроссель с замкнутым ферромагнитным магнитопроводом, имеющим две одинаковые обмотки.

Действие реактора видно из рис. 9.4. Сплошными линиями показаны фазные напряжения одной звезды, а штриховыми — другой. Разницу мгновенных значений фазных напряжений в процессе их чередования характеризуют ординаты заштрихованных площадок. Эта раз-

ница напряжений наводится в секциях уравнительного реактора $L_{ур}$, если хотя бы по одной из них проходит небольшой намагничивающий ток. В секциях реактора наводятся напряжения $U_{у1} = U_{у2} = {}^1/_2 U_у$, имеющие разные знаки по отношению к общему выводу; в связи с этим анодные напряжения одной звезды уменьшаются на $U_{у1}$, а другой — возрастают на $U_{у2}$. Фазные напряжения выравниваются, что и приводит к параллельной работе трехфазных групп. Приближенно $U_у = U_{2ф}/2$.

Кривая выпрямленного напряжения U_d приведена на рис. 9.4. Длительность анодных токов (без учета коммутационных участков) равна 120°, а амплитуда токов в вентилях — половине амплитудного значения выпрямленного тока. Выпрямитель имеет две коммутирующие группы вентилей: *VD1*, *VD2*, *VD3* и *VD4*, *VD5*, *VD6*. Коммутация осуществляется только между вентилями одной трехфазной группы. В выпрямителях с жесткими внешними характеристиками вентили работают попарно. Таким образом, при малых токах нагрузки выпрямитель будет работать в режимах соответствующих простой шестифазной схеме с нулевой точкой; при токах больше критического ($0{,}01 I_d$) наступает работа двух параллельных групп или двойной трехфазный режим. Первичная обмотка трансформатора может быть включена звездой или треугольником. Пульсация выпрямленного напряжения имеет частоту 300 Гц.

Среднее значение выпрямленного напряжения при холостом ходе

$$U_{х.х} = 1{,}35 U_{2ф}; \quad U_{х.х} = 1{,}35 U_{2ф} \cos \alpha$$

при работе в режимах, соответствующих простой шестифазной схеме. Напряжение, соответствующее критическому току при двойном трехфазном режиме, принимаемое условно за напряжение холостого хода,

$$U'_{х.х} = 1{,}17 U_{2ф}; \quad U'_{х.х} = 1{,}17 U_{2ф} \cos \alpha.$$

Следует отметить, что угол α принято отсчитывать в рассматриваемой схеме от точки естественного зажигания в трехфазных, а не в шестифазных системах, что находится в соответствии с работой схемы в двойном трехфазном режиме.

Обратное напряжение на вентиле

$$U_{обр\,m} = \sqrt{6}\, U_{2ф} = 2{,}09 U_{х.х}.$$

Таблица 9.2

Схема выпрямления	$\frac{I_{в.\,ср}}{I_d}$	$\frac{I_в}{I_d}$	$\frac{I_в}{I_{в.\,ср}}$	$\frac{U_{обр\,m}}{U_{х.\,х}}$	$\frac{U_{обр\,m}}{U_{2ф}}$	$\frac{I_{в\,m}}{I_{в.\,ср}}$	$\frac{I_{в\,m}}{I_d}$
Трехфазная мостовая	0,333	0,578		1,045	2,45		1
Двойная трехфазная схема с уравнительным реактором	0,167	0,288	1,73	2,09	4,9	3,14	0,5
Простая шестифазная схема с нулевой точкой		0,41	2,46			6,28	1
Кольцевая							

Действующее значение вторичного тока

$$I_2 = 0{,}29 I_d,$$

первичного

$$I_1 = \frac{1}{n} \cdot 0{,}408 I_d,$$

где n — коэффициент трансформации.

В выпрямителях с падающими внешними характеристиками в диапазоне $0 \leqslant U_д / U_{х.\,х} \leqslant 0{,}65$ работают одновременно по три вентиля с углом проводимости, близким к π. В этом случае снижаются значения I_2 и I_1 и значение $k_ф = 1{,}57$. Основные соотношения, характеризующие работу схемы, приведены в табл. 9.2 и 9.3.

Мощность уравнительного реактора $P_{ур.\,р}$ составляет при отсутствии тиристорного регулирования около $0{,}07 P_d$, при тиристорном регулировании $0{,}2 P_d$, где $P_d = I_d U_{х.\,х}$.

Схема имеет повышенную чувствительность к асимметрии фазовых сдвигов управляющих импульсов. Нарушение симметрии импульсов приводит к перераспределению нагрузки между параллельно работающими трехфазными выпрямительными группами. Разбаланс токов повышается при использовании трансформаторов с малым индуктивным сопротивлением рассеяния и глубоким фа-

Таблица 9.3

Схема выпрямления	Тип * выпрямителя	Вид нагрузки	$\frac{I_2}{I_d}$	$\frac{I_1}{I_d}$	$\frac{U_{х.х}}{U_{2ф}}$	Расчетная мощность		
						первичных обмоток P_1	вторичных обмоток P_2	трансформатора $P_т$
Трехфазная мостовая	ЖХ	Активно-индуктивная	0,815		2,34	$1{,}05 I_d U_{х.х}$		
	ПХ	Противо-ЭДС	0,745 **			$0{,}95 I_d U_{х.х}$		
Двойная трехфазная с уравнительным реактором	ЖХ	Активно-индуктивная	0,29	0,408	1,17	$1{,}05 I_d U_{х.х}$	$1{,}48 I_d U_{х.х}$	$P_т + P_{ур.р} = (1{,}26 + 0{,}07) I_d U_{х.х}$
	ПХ	Противо-ЭДС	0,26 **	0,37 **		$0{,}95 I_d U_{х.х}$	$1{,}33 I_d U_{х.х}$	$P_т + P_{ур.р} = (1{,}14 + 0{,}07) I_d U_{х.х}$
Простая шестифазная с нулевой точкой	ЖХ	Активно-индуктивная	0,407	0,58	1,35	$1{,}81 I_d U_{х.х}$	$1{,}28 I_d U_{х.х}$	$1{,}55 I_d U_{х.х}$
	ПХ	Противо-ЭДС	0,37 **	0,525 **		$1{,}65 I_d U_{х.х}$	$1{,}16 I_d U_{х.х}$	$1{,}4 I_d U_{х.х}$
Кольцевая	ЖХ	Активно-индуктивная	0,578	0,816	2,34	$1{,}05 I_d U_{х.х}$	$1{,}48 I_d U_{х.х}$	$1{,}265 I_d U_{х.х}$
	ПХ	Противо-ЭДС	0,52 **	0,73 **		$0{,}95 I_d U_{х.х}$	$1{,}36 I_d U_{х.х}$	$1{,}15 I_d U_{х.х}$

* ПХ — выпрямитель с падающими внешними характеристиками, полученными за счет введения значительного индуктивного сопротивления в анодные цепи вентилей; ЖХ — выпрямитель с жесткими внешними характеристиками, имеющий незначительное индуктивное сопротивление в анодных цепях вентилей.

** Значения для ПХ даны при $0 \leqslant U_d / U_{х.х} \leqslant 0{,}45$.

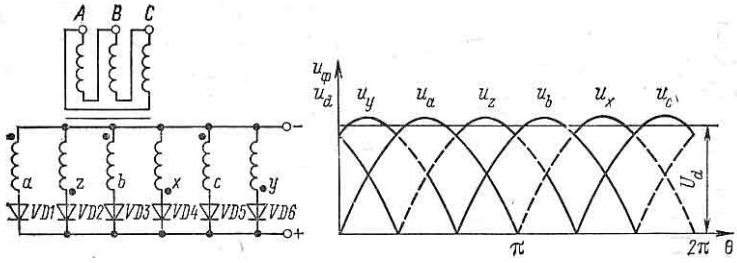


Рис. 9.5. Простая шестифазная схема с нулевой точкой

зовым регулированием. При напряжении короткого замыкания $e_к$ силового трансформатора 7—10 % допустимая несимметрия отдельных импульсов может достигать 3°.

В рассматриваемой схеме выпрямления катоды всех тиристоров объединены в общую точку, поэтому подача отпирающих импульсов на управляющие электроды тиристоров возможна без разделительных трансформаторов. Для нормальной параллельной работы тиристоров разных трехфазных групп ширина импульсов управления должна быть не менее 60°. В противном случае наблюдаются срывы в работе выпрямителя и переход к трехфазному режиму при холостом ходе и малых нагрузках.

Простая шестифазная схема с нулевой точкой. Эта схема выпрямления сравнительно редко встречается в сварочной технике. По сравнению с шестифазной схемой с уравнительным реактором она обеспечивает худшее использование силового трансформатора и вентилей. Без учета коммутационных участков продолжительность тока, протекающего через вентили, и тока в фазе вторичной обмотки трансформатора составляет 60°. В связи с этим увеличиваются потери в вентилях, максимальное значение $I_{вт}$ и $k_ф$, снижается нагрузочная способность выпрямительного блока. Как видно из рис. 9.5, трансформатор имеет всего шесть вторичных обмоток, соединенных в шестифазную звезду. Первичная обмотка трансформатора может соединяться только треугольником.

При соединении первичной обмотки в звезду появляется пульсирующий поток вынужденного намагничивания, приводящий к насыщению магнитопровода трансформатора, сильному увеличению его индуктивных сопротивлений, уменьшению среднего значения выпрямленного напряжения и увеличению крутизны спада внешней ха-

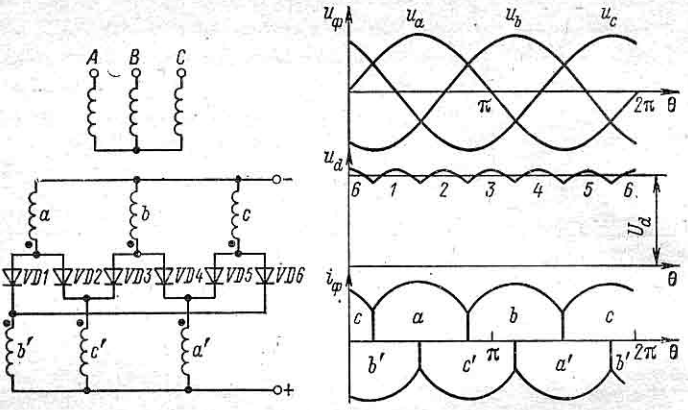


Рис. 9.6. Кольцевая схема выпрямления

рактеристики. Пульсация выпрямленного напряжения имеет частоту 300 Гц. Обратное напряжение на вентиле $U_{обр\ m} = 2{,}09U_{х.\ х}$. Коэффициент формы тока в вентилях $k_ф = 2{,}45$. Нормальная работа выпрямителя обеспечивается при ширине импульса управления 5°. Соотношения, характеризующие работу схемы, приведены в табл. 9.2 и 9.3.

Кольцевая схема выпрямления. Это одна из наиболее распространенных схем выпрямления в однопостовых и многопостовых сварочных выпрямителях на большие токи. Не имея уравнительного реактора, схема обеспечивает аналогично двойной трехфазной схеме с уравнительным реактором хорошее использование сварочного трансформатора при несколько худшем использовании вентилей по току. Как видно из рис. 9.6, трансформатор выпрямителя имеет шесть вторичных обмоток, а блок вентилей замкнут в кольцо.

Продолжительность работы вентилей без учета коммутации составляет 60°. В то же время каждая из вторичных обмоток, как видно из диаграммы фазных токов $i_ф$ (рис. 9.6), работает на протяжении 120°. Первичная обмотка трансформатора может быть соединена треугольником или звездой.

Амплитудное значение обратного напряжения на вентиле

$$U_{обр\ m} = 4{,}9U_{2ф}.$$

Основные соотношения, характеризующие работу схемы при активно-индуктивной нагрузке, приведены в табл. 9.2 и 9.3. Минимальная ширина управляющих импульсов в случае тиристорного регулирования должна составлять 5°. Для управления тиристорами требуются три гальванически изолированных источника питания.

Внешние характеристики трехфазной мостовой, двойной трехфазной с уравнительным реактором и кольцевой схем одинаковы при равных значениях напряжения короткого замыкания трансформаторов.

9.4. ОДНОПОСТОВЫЕ СВАРОЧНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Однопостовые сварочные выпрямители представляют наиболее массовую группу выпрямителей, применяемую во всех отраслях народного хозяйства при различных способах сварки.

Однопостовые сварочные выпрямители с падающими внешними характеристиками. Это самая распространенная категория выпрямителей, предназначенных для ручной дуговой сварки штучными электродами и для ручной и механизированной сварки под флюсом. Основные параметры выпрямителей регламентированы ГОСТ 13821—77.

Сварочные качества выпрямителей характеризуются стабильностью начального возбуждения дуги и процесса сварки, хорошим качеством формирования шва и сравнительно малым разбрызгиванием электродного металла. Перенос металла при оптимальных режимах ручной дуговой сварки происходит с периодическими замыканиями каплями дугового промежутка, и лишь при удлинении дуги возможна крупнокапельная форма переноса без коротких замыканий.

Разбрызгивание электродного металла при нормальных режимах ручной дуговой сварки происходит вследствие двух причин: выброса частиц металла из капель на электроде из-за интенсивного местного газовыделения и давления газов в объеме металла; разрушения шейки капли, соединяющей электрод и ванну, в результате электрического взрыва при коротком замыкании. Следовательно, разбрызгивание связано с пиками сварочного тока в момент короткого замыкания и зависит от статических и динамических характеристик источника питания.

В связи с этим были проведены экспериментальные исследования сварочных качеств выпрямителей для ручной

Таблица 9.4

Схема	$U_{х.х}$	$\beta I_{св}$, %	$I_{к.з.уст}/I_d$			
			U_d=26 В I_d = 300 А	U_d=24 В I_d = 200 А	U_d=22 В I_d = 100 А	U_d=21 В I_d=60 А
ТМ	75	24	1,17	1,13	1,11	1,1
TML_1		20,3	1,19	1,17	1,12	1,15
TML_2		18	1,26	1,28	1,21	1,19
4Ф		32,5	1,24	1,16	1,17	1,13
$4ФL_1$		25	1,35	1,26	1,22	1,16
$4ФL_2$		22	1,46	1,45	1,38	1,29
6Ф△		20	1,47	1,44	1,28	1,34
6У	85		1,17		1,14	
ТО	75	40	1,98	1,82	1,73	1,68

дуговой сварки, выполненных по различным схемам выпрямления с использованием для получения падающих характеристик наиболее распространенных трансформаторов с повышенным рассеянием. Эти исследования позволили выявить наиболее целесообразные в отношении разбрызгивания металла схемы выпрямления, а также связь между пиком сварочного тока при коротком замыкании дугового промежутка, разбрызгиванием и устойчивостью сварочного процесса.

Выпрямители были собраны по трехфазной однополупериодной схеме выпрямления при соединении первичных обмоток трансформатора треугольником (ТО), четырехфазной схеме (4Ф), трехфазной мостовой схеме (ТМ), простой шестифазной схеме «треугольник—шестифазная звезда» (6Ф △) и шестифазной схеме «двойная звезда с уравнительным реактором» (6У).

Для получения четырехфазной несимметричной схемы выпрямления первичные обмотки трехстержневого трансформатора располагались на крайних стержнях магнитопровода и соединялись открытыми треугольниками, при этом вторичные обмотки на этих стержнях состояли каждая из двух полуобмоток с выведенной средней точкой. Кроме того, в сварочную цепь выпрямителей, собранных по трехфазной мостовой и четырехфазной схемам выпрямления, дополнительно включался дроссель с индуктивно-

Таблица 9.5

$I_{св}$, А	$U_{св}$, В	Диаметр электрода, мм	$t_ц \cdot 10^{-3}$, с	$t_{к.з} \cdot 10^{-3}$, с	N, $с^{-1}$
300	25—28	6	390	10,9	2,55
200	23—26	5	313	9,6	3,2
100	22—24	3	180	5,9	5,6
60		2	115	4,0	8,7

стью $L_1 = 150$ мкГн и $L_2 = 500$ мкГн (TML_1, TML_2, $4ФL_1$ и $4ФL_2$). Данные по статическим внешним характеристикам выпрямителей, снятым при их работе на активную нагрузку, характеризующие их наклон в рабочей зоне, приведены в табл. 9.4, там же дана пульсация тока при сварке $\beta I_{св}$. Крутизна наклона определена как отношение установившегося тока короткого замыкания на внешней характеристике $I_{к.з.уст}$ к рабочему току I_d при напряжении на нагрузке U_d. По значению I_d и U_d близки к току и напряжению при сварке $I_{св}$ и $U_{св}$.

Число коротких замыканий N, длительность цикла сварки $t_ц$ и время короткого замыкания $t_{к.з}$ зависят от диаметра и типа электрода, длины дуги, сварочного тока и т. д. Усредненные значения этих величин даны в табл. 9.5 для электродов типа УОНИ 13/45, с которыми и проводились исследования.

Первоначальное возбуждение дуги протекает устойчиво у всех схем выпрямления, в том числе и с индуктивностью и без индуктивности в сварочной цепи. Значения коэффициента расплавления близки у всех схем и отличаются не более чем на 1—2 %. По разбрызгиванию схемы выпрямления значительно отличаются. Коэффициент угара и разбрызгивания φ следует рассматривать совместно с переходными процессами, связанными как с динамическими особенностями схем, так и с их внешними характеристиками. Для определения этой связи по осциллограммам сварочного процесса подсчитано процентное распределение числа коротких замыканий m_i при сварке, закончившихся при различных отношениях $n_i = I_{к.з\,max\,i}/I_{св.ср}$, а затем и среднее $n_{ср}$ для каждого режима, где $n_{ср} = \sum_1^k n_i m_i/100$.

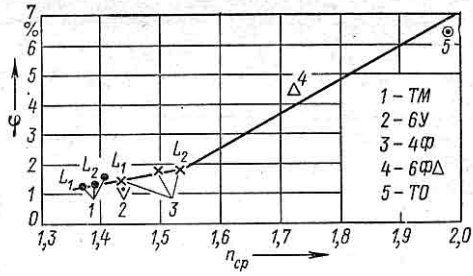


Рис. 9.7. Зависимость φ от $n_{ср}$ (электроды типа УОНИ 13/45, диаметр электрода 6 мм, $I_{св} \approx 300$ А)

На рис. 9.7—9.10 построены зависимости между значениями коэффициентов φ и $n_{ср}$. Сварка электродами 6 мм на токах 300 А протекает устойчиво у всех схем выпрямления. Как видно из рис. 9.7, в диапазоне изменения $n_{ср} = 1{,}35 \ldots 1{,}55$ увеличение разбрызгивания с ростом пиков тока при коротком замыкании дугового промежутка незначительно. При дальнейшем росте $n_{ср}$, свыше значений 1,55 ... 1,6, являющихся критическими, наблюдается большое увеличение разбрызгивания; подобное явление характерно для схем с более пологими внешними характеристиками — шестифазной схемы «треугольник — шестифазная звезда» и трехфазной однополупериодной.

Хорошие результаты дают трехфазная мостовая, шестифазная при соединении двойной звездой с уравнительным реактором и четырехфазная схемы выпрямления. Введение дросселя со сравнительно небольшой индуктивностью L_1 и L_2 при значительном времени короткого замыкания дугового промежутка при сварке на токе 300 А практи-

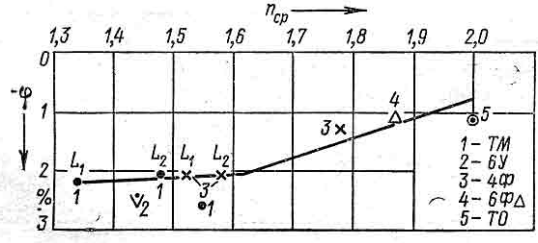


Рис. 9.8. Зависимость φ от $n_{ср}$ (электроды типа УОНИ 13/45, диаметр электрода 5 мм, $I_{св} \approx 200$ А)

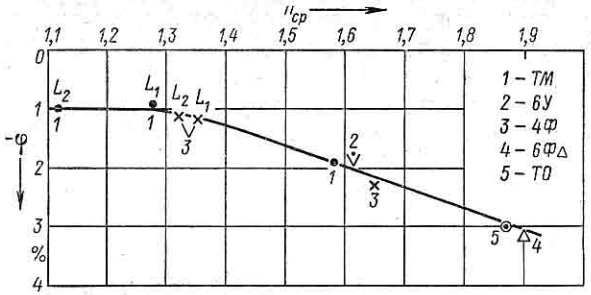


Рис. 9.9. Зависимость φ от $n_{ср}$ (электроды типа УОНИ 13/45, диаметр электрода 3 мм, $I_{св} \approx 100$ А)

чески уже не влияет на разбрызгивание, тем более, что пики токов трехфазной мостовой и четырехфазной схем выпрямления сами находятся в зоне малого их влияния. Зависимость между разбрызгиванием и пиками сварочного тока при сварке электродами диаметром 5 мм на токах около 200 А (рис. 9.8) по своему характеру аналогична таковой зависимости в режиме 300 А.

При сварке на токах 100 и 60 А электродами диаметром 3 и 2 мм характер указанных выше зависимостей значительно изменяется. Как видно из рис. 9.9, в режиме 100 А имеется зона незначительной зависимости разбрызгивания от пиков тока при $n_{ср} = 1{,}1 \ldots 1{,}4$. Однако в указанной зоне при $n_{ср} = 1{,}35$ и ниже, особенно при $n_{ср} = 1{,}12$ с диапазоном изменения 0,9—1,2, имеет место «примерзание» электрода и нарушение процесса свар-

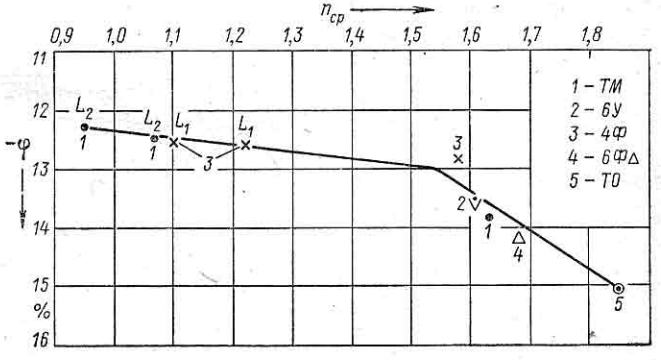


Рис. 9.10. Зависимость φ от $n_{ср}$ (электроды типа УОНИ 13/45, диаметр электрода 2 мм, $I_{св} \approx 60$ А)

ки. Значение $n < 1$ объясняется тем, что момент короткого замыкания приходится на впадину в кривой пульсации сварочного тока. При увеличении $n_{ср}$ свыше 1,4—1,6 процесс сварки становится устойчивым и разбрызгивание несколько снижается. Схемы выпрямления, имеющие повышенное значение пиков тока, такие, как шестифазная схема с первичной обмоткой трансформатора, включенной треугольником, и трехфазная однополупериодная, дают в этих режимах наилучшие сварочные показатели. Аналогичные явления наблюдаются и при сварке на токах 60 А с электродом диаметром 2 мм.

Таким образом, при ручной дуговой сварке электродами 2 и 3 мм на токах 100 и 60 А весьма существенное значение имеет нарушение устойчивости процесса сварки при снижении пиков сварочного тока, в частности за счет введения индуктивности в сварочную цепь. Такое явление вызвано снижением динамического и теплового воздействий на перемычку расплавленного металла в момент отделения капли, что подтверждается практически полным отсутствием зависимости между пиками сварочного тока и разбрызгиванием.

Сварочные качества исследовались с применением схем выпрямления, имеющих различное значение коэффициента пульсации тока $\beta I_{св}$. Однако при наличии значительной постоянной составляющей в сварочном токе различие в коэффициенте пульсации не влияет на разбрызгивание. Например, трехфазная мостовая и шестифазная схемы имеют почти одинаковую пульсацию при различных значениях коэффициента разбрызгивания.

Таким образом, одним из основных параметров, обеспечивающих связь между динамическими свойствами выпрямителей для ручной дуговой сварки и разбрызгиванием, является амплитуда тока короткого замыкания при коротком замыкании каплей металла дугового промежутка. Следовательно, и анализ переходных процессов выпрямителей следует вести по результатам осциллограмм переходных процессов «нагрузка — короткое замыкание», связанных с изменениями дугового промежутка в процессе сварки и определяющих рабочие свойства выпрямителей. При известном усредненном значении времени короткого замыкания при сварке (см. табл. 9.5) по осциллограммам вышеуказанного переходного процесса, снятым при работе выпрямителей на активную нагрузку при I_d и U_d, соответствующих режиму сварки,

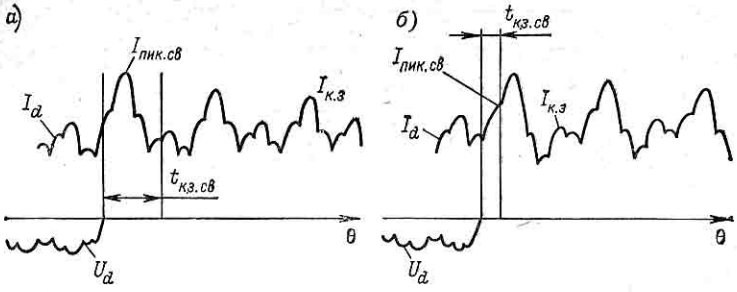


Рис. 9.11. Определение пиков сварочного тока по кривым переходного процесса «нагрузка — короткое замыкание»: *а* — ТМ (I_d = = 59,8 А; U_d = 21 В); *б* — ТМ (I_d = 300 А; U_d = 26 В)

может быть найден максимальный пик тока короткого замыкания при сварке, дающий возможность практически оценить разбрызгивание у сварочного выпрямителя. Пример определения максимальных пиков тока по указанному методу дан на рис. 9.11 для сварочного выпрямителя, собранного по трехфазной мостовой схеме выпрямления, при сварке на режимах 60 и 300 А. При сварке на режимах 60 и 100 А пики тока короткого замыкания, определяемые таким методом, близки к пикам тока, полученным при осциллографировании аналогичных режимов сварки. При бóльших токах, например 200 и 300 А, значения $n_{ср}$, полученные из осциллограмм переходного процесса «нагрузка — короткое замыкание», следует уменьшить на 15—20 %. Уменьшение $n_{ср}$ по сравнению с данными переходного процесса связано с тем, что в реальных условиях сварки возможны короткие замыкания, время которых меньше усредненных значений $t_{к.з.св}$ и которые не имеют максимальных значений пиков тока, обусловленных переходным процессом. В результате $n_{ср}$ несколько снижается.

Таким образом, рекомендуемые значения $I_{пик.св}/I_d$, полученные из осциллограмм переходного процесса, должны лежать в следующих пределах:

для сварки на токах 200—300 А

$$1{,}3 \leqslant I_{пик.св}/I_d \leqslant 1{,}9;$$

для сварки на токах 60—100 А

$$1{,}4 \leqslant I_{пик.св}/I_d \leqslant 2{,}2,$$

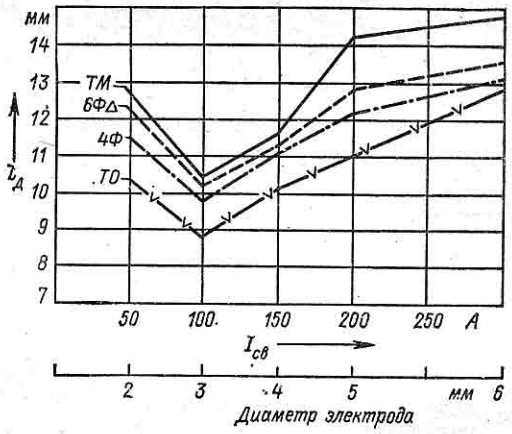


Рис. 9.12. Зависимость разрывной длины дуги от схемы выпрямления

где $I_{пик.\,св}$ — пик тока короткого замыкания в момент, определяемый временем $t_{к.\,з.\,св}$; I_d — ток нагрузки в режиме, соответствующем сварочному.

Процесс возбуждения дуги, а в отдельных случаях и сварка зависят от разрывной длины дуги $l_д$. Во всех рассмотренных схемах обрывам дуги не предшествуют разрывы в кривой сварочного тока. Обрыв дуги происходит на токах, близких к 7—8 А, что и приводит к уменьшению $l_д$ у схем, имеющих большую глубину пульсации сварочного тока. Как видно из рис. 9.12, наименьшее значение $l_д$ имеет трехфазная однополупериодная схема выпрямления, главным образом при диаметрах электрода 2 и 3 мм при сварке на токах 50 и 100 А.

Из рассмотрения общего комплекса сварочных и энергетических показателей схем выпрямления следует считать наиболее целесообразным выполнять выпрямители для ручной дуговой сварки на токи до 500 А, имеющие в качестве регулирующего органа трансформаторы с повышенным рассеянием, по трехфазной мостовой схеме выпрямления. Применение в однопостовых сварочных выпрямителях простой шестифазной и трехфазной однополупериодной схем выпрямления нецелесообразно.

Выпрямители с падающими характеристиками выпускаются с различными способами регулирования тока: с механическим регулированием (ВД-201, ВД-306, ВД-401),

дросселями насыщения (ВД-502-2), а также с тиристорным регулированием (выпрямители с универсальными внешними характеристиками).

Выпрямители с механическим регулированием. Выпрямители для ручной дуговой сварки с механическим регулированием завоевали широкую популярность благодаря простоте конструкции, надежности в работе, легкости в обслуживании, высоким сварочным качествам. Для получения падающих внешних характеристик и регулирования сварочного тока используются в основном две системы механического регулирования: трансформаторы с подвижными магнитными шунтами и трансформаторы с подвижными катушками. Трансформаторы с подвижными магнитными шунтами в трехфазном варианте широко применяются в сварочных выпрямителях за рубежом. Основное достоинство данной системы регулирования — возможность достижения достаточно широких пределов сварочного тока в одном диапазоне. Однако это возможно только при очень малых воздушных зазорах (0,5 мм) между подвижным шунтом и стержнями трансформатора. Обеспечение таких зазоров в условиях массового производства представляет большие технологические трудности. Кроме того, трехфазные трансформаторы с магнитным шунтом и расположением стержней магнитопровода в одной плоскости имеют большую несимметрию магнитных проводимостей полей рассеяния средней и крайней фаз, которая значительно больше, чем у трансформаторов с подвижными катушками. При шунтах, введенных в окна магнитопровода, несимметрия вторичных напряжений, а также линейных и фазных токов весьма значительна, что приводит к увеличению расхода активных материалов и снижает сварочные качества выпрямителей.

Значительное распространение в выпрямителях для ручной дуговой сварки получили трансформаторы с подвижными катушками. Подобный вид регулирования имеют выпрямители ВД-201, ВД-306, ВД-401.

Несимметрия вторичных напряжений, линейных и фазных токов у таких трансформаторов значительно меньше, чем у трансформаторов с подвижными шунтами (не превышает 15—18 %), и нет необходимости в специальных мерах по ее уменьшению. Трансформаторы (рис. 9.13) имеют простую конструкцию с небольшим расходом активных материалов и используются также в блоках подпитки тиристорных сварочных выпрямителей. При

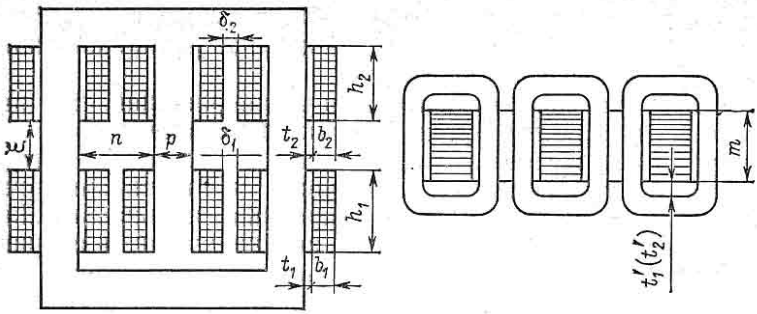


Рис. 9.13. Трехфазный трансформатор с подвижными катушками для сварочных выпрямителей

наличии двух диапазонов тока удается получить достаточно широкие пределы регулирования.

На рис. 9.14 приведена принципиальная электрическая схема выпрямителя ВД-306. Переключение диапазонов осуществляется за счет соединения первичных и вторичных обмоток трансформатора *Т1* «треугольник—треугольник» (диапазон больших токов) или «звезда—звезда» (диапазон малых токов). Такой способ получения двух диапазонов обеспечивает изменение сварочного тока в три раза без дополнительного расхода активных материалов. Плавное регулирование тока внутри диапазона производится за счет изменения расстояния между катушками обмоток трансформатора (см. рис. 9.13). При сближении катушек индуктивность рассеяния обмоток и их индуктивные сопротивления уменьшаются — сварочный ток растет. При увеличении расстояния между катушками ток уменьшается. Катушки первичной обмотки — подвижные и перемещаются ходовым винтом вручную, катушки вторичной обмотки — неподвижные и закреплены у верхнего ярма магнитопровода трансформатора. Перекрытие диапазонов обеспечивается при регулировании тока внутри диапазона в отношении 1 : 3.

Выпрямительные блоки ВД-201, ВД-306 и ВД-401, выполненные по трехфазной мостовой системе выпрямления, состоят из шести кремниевых вентилей В200 кл. 3 и выше. Вентиляция — воздушная принудительная. Нормальная работа системы вентиляции контролируется ветровым реле *КЗ* (рис. 9.14). Переключение диапазонов производится переключателем *S*.

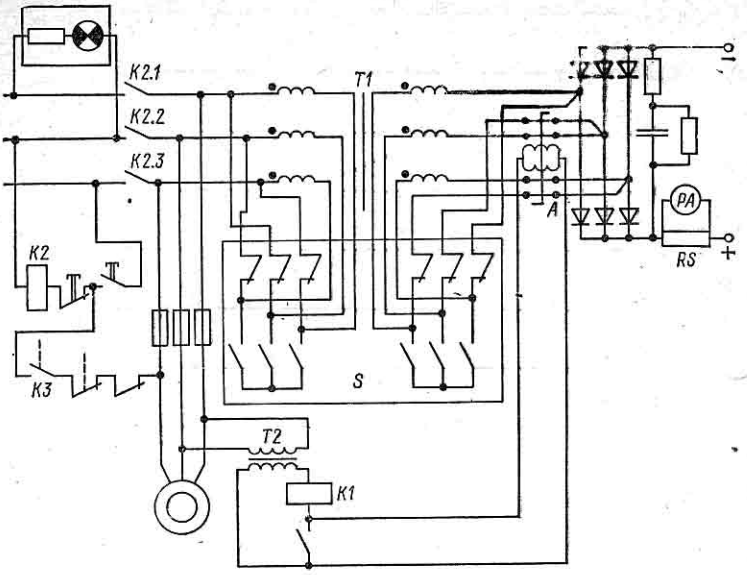


Рис. 9.14. Принципиальная схема сварочного выпрямителя ВД-306

Выпрямитель ВД-306 имеет защиту, отключающую его от сети при выходе из строя одного из вентилей выпрямительного блока или при пробое на корпус вторичной обмотки трансформатора, состоящую из магнитного усилителя *А*, трансформатора *Т2* и реле *К1*. Переменный ток, текущий по фазным проводам, проходящий через окно тороидального магнитопровода магнитного усилителя, не насыщает магнитопровод, и все напряжение падает на обмотках усилителя. В аварийных режимах в фазных токах трансформатора *Т1* появляется постоянная составляющая, магнитопровод магнитного усилителя *А* насыщается, реле *К1* срабатывает и размыкает цепь магнитного пускателя *К2*, отключающего выпрямитель от сети. Аналогичная защита применена в выпрямителе ВД-401.

Внешние характеристики выпрямителя ВД-306 даны на рис. 9.15.

В табл. 9.6 приведены технические характеристики сварочных выпрямителей ВД-201, ВД-306 и ВД-401.

Для расчета трансформаторов к выпрямителям подобного типа необходимо с достаточной точностью определить фазное индуктивное сопротивление рассеяния трансфор-

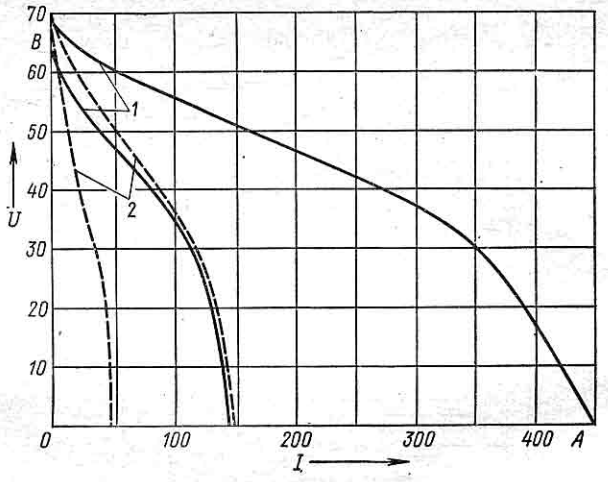


Рис. 9.15. Внешние характеристики сварочного выпрямителя ВД-306
1 — катушки сдвинуты; *2* — катушки раздвинуты; сплошные кривые — диапазон больших токов; штриховые — диапазон малых токов

Таблица 9.6

Параметры	ВД-201	ВД-306	ВД-401	ВД-502-2
Номинальный сварочный ток, А	200	315	400	500
Номинальный режим работы, ПН, %	60			
Продолжительность цикла сварки, мин	5			
Номинальное рабочее напряжение, В	28	32	36	40
Напряжение холостого хода, В, не более	70		80	
Пределы регулирования сварочного тока, А	30—200	45—315	50—450	50—500
Первичная мощность, кВ·А, не более	15	21	28	42
КПД, %, не менее	60	72	69	78
Габаритные размеры (длина×ширина×высота), мм	716××622××775	785××780××795	772××770××785	810××560××1062
Масса, кг не более	120	164	200	330

матора $X_ф$ при коротком замыкании в зависимости от расстояния между катушками ξ.

Необходимые величины $X_{ф\,max}$ и $X_{ф\,min}$, приведенные ко вторичной обмотке трансформатора, определяются исходя из напряжения холостого хода выпрямителя $U_{х.х}$ и заданного диапазона регулирования с учетом трехвентильного режима работы трехфазной мостовой схемы выпрямления. В этом случае при соединении обмоток трансформатора треугольником

$$X_ф = \frac{U_{х.х}\sqrt{3}}{1{,}35 I_{к.з} \cdot 0{,}745},$$

где $I_{к.з}$ — ток короткого замыкания выпрямителя при заданном режиме работы.

Индуктивное сопротивление $X_ф$ слагается из индуктивного сопротивления, обусловленного потоком рассеяния в окне трансформатора, и индуктивного сопротивления лобовых частей обмоток — катушек.

Индуктивное сопротивление рассеяния фаз трансформатора в его окне составит:

крайних фаз

$$X_{кр.ок} = \sqrt{3}\omega\mu_0 g w_2^2 \left(\frac{h_1 + h_2}{3} + \xi\right);$$

средней фазы

$$X_{ср.ок} = 3\omega\mu_0 g w_2^2 \left(\frac{h_1 + h_2}{3} + \xi\right),$$

где h_1, h_2 — высота первичных и вторичных катушек; ξ — расстояние между катушками; w_2 — число витков вторичной обмотки трансформатора; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; $\omega = 2\pi f$; g — проводимость при $\mu = 1$ от среднего к крайнему стержню магнитной системы, отнесенная к единице длины стержней, зависящая от отношения ширины окна n к длине набора m магнитопровода и учитывающая выпучивание магнитных силовых линий в окне трансформатора.

Значение g можно определить по формуле

$$g = m/n + 1{,}5\sqrt[4]{m/n}.$$

Индуктивное сопротивление лобовых частей обмоток трансформатора зависит от потока рассеяния, связанного с катушкой собственной фазы, и не зависит от ξ.

Индуктивное сопротивление лобовых частей:
средней фазы

$$X_{\text{ср. л}} = 8\pi f \cdot 10^{-9} w_2^2 (l_{\text{ср}} - 2gn) \ln \frac{g_{12}^2}{g_1 g_2};$$

при $l_{\text{ср}} - 2gn < 0$ сопротивление $X_{\text{ср. л}} = 0$;
крайней фазы

$$X_{\text{кр. л}} = 8\pi f \cdot 10^{-9} w_2^2 (l_{\text{ср}} - gn) \ln \frac{g_{12}^2}{g_1 g_2},$$

где $l_{\text{ср}} = (l_1 + l_2)/2$; l_1 и l_2 — средняя длина витка катушек первичной и вторичной обмоток, см.

Средние геометрические расстояния:

$$g_1 = 0{,}223\,[2\,(b_1 + t_1) + h_1]; \quad g_2 = 0{,}223\,[2\,(b_2 + t_2) + h_2];$$

$$g_{12} = 2C\left(0{,}22 + 0{,}75\frac{h}{2C}\right) \text{ при } C = \frac{b_1 + b_2 + t_1 + t_2}{2};$$

$$h = (h_1 + h_2)/2,$$

где b_1 и b_2 — ширина сечения катушек первичной и вторичной обмоток, см; t_1 и t_2 — расстояния между стержнем магнитопровода и катушками.

Суммарное индуктивное сопротивление рассеяния крайних фаз трансформатора

$$X_{\Sigma\,\text{кр}} = \sqrt{X_{\text{кр. ок}}^2 + \sqrt{3}\,X_{\text{кр. л}} X_{\text{кр. ок}} + X_{\text{кр. л}}^2}.$$

Однако с достаточной точностью (3—5 %) можно считать

$$X_{\Sigma\,\text{кр}} = X_{\text{кр. ок}} + X_{\text{кр. л}}.$$

Суммарное сопротивление средней фазы

$$X_{\Sigma\,\text{ср}} = X_{\text{ср. ок}} + X_{\text{ср. л}}.$$

Расчетное усредненное значение индуктивного сопротивления рассеяния фазы трансформатора принято равным

$$X_{\text{ф}} = (X_{\Sigma\,\text{ср}} + 2X_{\Sigma\,\text{кр}})/3.$$

Расчет трехфазного трансформатора с подвижными катушками ведется исходя из заданных значений $X_{\min}$ и $X_{\max}$ в зависимости от расстояния между обмотками. При этом все расчетные формулы и геометрические размеры трансформатора выражаются через число витков вторичной обмотки w_2, расстояние между обмотками

(в сантиметрах), отношение высоты сечения первичной обмотки к ее ширине $\nu = h_1/b_1$ и отношение длины набора магнитопровода к ширине его пластины $\lambda = m/p$.

Основные соотношения геометрических параметров приведены ниже в соответствии с рис. 9.13.

Высота сечения катушки первичной обмотки в сантиметрах

$$h_1 = C_{к1}\sqrt{w_2 q_1 \nu},$$

где $C_{к1} = \sqrt{n k_{и1} k_b k_h}$; n — коэффициент трансформации; $k_{и1}$ — коэффициент увеличения сечения витка за счет изоляции (для провода АПСД равен 1,14—1,35 в зависимости от сечения провода); k_b и k_h — коэффициенты разбухания обмотки по ширине и высоте, равные соответственно около 1,12 и 1,15; w_2 — число витков вторичной обмотки; q_1 — сечение витка первичной обмотки, см^2.

Ширина сечения катушки первичной обмотки в сантиметрах

$$b_1 = C_{к1}\sqrt{w_2 q_1/\nu}.$$

Высота сечения катушки вторичной обмотки в сантиметрах

$$h_2 = C_{к2}^2 w_2 q_2/b_2,$$

где $C_{к2} = \sqrt{k_{и2} k_b k_h}$; q_2 — сечение витка вторичной обмотки, см^2.

Ширина сечения катушки вторичной обмотки в сантиметрах

$$b_2 = t_1 - t_2 + (\delta_1 - \delta_2)/2 + b_1,$$

где δ_1, δ_2 — расстояние между катушками, равное 1—1,3 см.

Ширина окна магнитопровода в сантиметрах

$$n = 2t_1 + \delta_1 + 2b_1.$$

Длина набора магнитопровода в сантиметрах

$$m = C_м\sqrt{\lambda/w_2},$$

где $C_м = \sqrt{\frac{U_{1ф}\cdot 10^{-4}}{4{,}44 f B_m n k_c}}$; $U_{1ф}$ — фазное напряжение первичной обмотки; n — коэффициент трансформации; f — частота сети, Гц; B_m — индукция в магнитопроводе трансформатора, равная 1,6—1,7 Тл; k_c — коэффициент заполнения магнитопровода сталью, равный 0,94—0,97.

Ширина пластины магнитопровода в сантиметрах

$$p = C_м/\sqrt{\lambda w_2}.$$

Средняя длина витка катушки первичной обмотки в сантиметрах

$$l_1 = 2(m + p + 2t_1 + 2t_1' - 4r_1) + 2\pi(r_1 + b_1/2),$$

то же вторичной обмотки

$$l_2 = 2(m + p + 2t_2 + 2t_2' - 4r_2) + 2\pi(r_2 + b_2/2),$$

где t_1', t_2' — зазоры между магнитопроводом и катушками в лобовых частях, равные около 1,5—2 см; r_1 и r_2 — радиусы намотки катушек, составляющие около 1,5—2 см.

Расчет индуктивного сопротивления рассеяния производится по формулам, приведенным ранее.

Значения t_1, t_2, t_1', t_2', δ_1, δ_2, ξ_{min} выбираются из конструктивных соображений.

Расстояние между катушками

$$\xi_{max} = \frac{X_{max} - \frac{2}{3}X_{кр.л} - \frac{1}{3}X_{ср.л}}{\left(1 + \frac{2\sqrt{3}}{3}\right)2\pi f\mu_0 w_2^2 g} - \frac{h_1 + h_2}{3}.$$

Потери в катушках первичной и вторичной обмоток:

$$P_1 = I_{1ф.экв}^2 R_{t1} k_{п1}; \quad P_2 = I_{2ф.экв}^2 R_{t2} k_{п2},$$

где R_{t1} и R_{t2} — сопротивления катушек первичной и вторичной обмоток с учетом выбранного класса изоляции.

Коэффициенты добавочных потерь катушек первичной и вторичной обмоток:

$$k_{п1} = 1 + 0{,}11\beta^2 \frac{b_1^2 h_1^2}{\lambda_g^2}\varphi_1 q_1; \quad k_{п2} = 1 + 0{,}11\beta^2 \frac{b_2^2 h_2^2}{\lambda_g^2}\varphi_2 q_2,$$

где $\beta = 0{,}64$ для алюминия и 0,96 для меди; φ_1 и φ_2 — отношение высоты сечения проводника первичной и вторичной обмоток к его ширине;

$$\lambda_g = \frac{2\pi f\mu_0 w_2^2}{X_0} l_{ср} \frac{h_1 + h_2}{3},$$

при этом X_0 рассчитывается аналогично X_{min} при $\xi = 0$.

Удельные потери в катушках первичной и вторичной обмоток:

$$P_{уд1} = P_1/П_{о1}; \quad P_{уд2} = P_2/П_{о2},$$

где $П_{о1}$ и $П_{о2}$ — поверхность охлаждения катушек первичной и вторичной обмоток.

Удельные потери также могут быть выражены в зависимости от числа витков и сечения обмоток.

Задаваясь значениями ν и λ, можно определить ω_2, q_1, q_2, все геометрические размеры и экономические показатели трехфазного трансформатора для сварочных выпрямителей. На рис. 9.16 и 9.17 приведены зависимости массы активных материалов от ν и λ для трансформатора к сварочному выпрямителю на 315 А. Аналогичный характер имеют кривые и для трансформаторов к выпрямителям на другие токи. На параметры трансформаторов большее влияние оказывает ν, к изменению λ они менее критичны. Для получения оптимальных экономических показателей следует принимать $\nu = 2 \ldots 2{,}5$ и $\lambda = 1{,}5 \ldots 3$. Максимальное значение коэффициента полезного действия соответствует $\lambda \approx 2$ и $\nu \approx 2{,}5$. Для практических расчетов следует брать λ и ν равными 2—2,5.

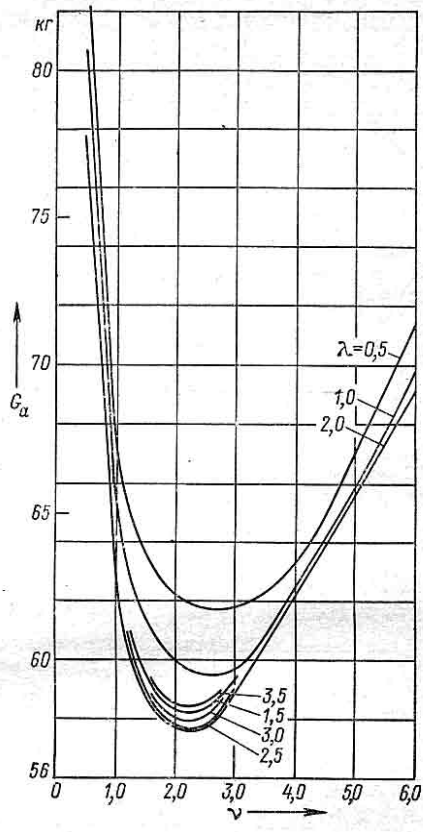


Рис. 9.16. Зависимость массы активных материалов от ν при $\lambda = \text{const}$

Большой интерес представляет окончательный расчет внешних характеристик выпрямителя. Форма внешних характеристик связана с режимами работы вентилей. Уравнение внешней характеристики, приведенное ниже, выведено применительно к трехвентильному режиму работы вентилей в трехфазной мостовой схеме выпрямления, охватывающему всю основную область рабочих режимов в диапазоне $0 \leqslant U_д/U_{х.х} \leqslant 0{,}7$, где $U_д$ и $U_{х.х}$ — соот-

ветственно напряжение дуги и напряжение холостого хода выпрямителя.

Расчет следует вести с учетом активных сопротивлений всех элементов выпрямителя и пульсации сварочного тока:

$$I_{\text{д}} = \frac{U_{\text{х. х}}}{\sqrt{3}\sqrt{X_{\text{ф}}^2 + R_{\text{экв}}^2}} \times$$

$$\times \sqrt{1 - \left(\frac{E_{\text{д. экв}} \sqrt{X_{\text{ф}}^2 + R_{\text{экв}}^2}\sqrt{3}}{R_{\text{экв}} U_{\text{х. х}} \pi} \frac{2 \operatorname{sh} \frac{R_{\text{экв}}}{X_{\text{ф}}} \frac{\pi}{3}}{1 - 2 \operatorname{ch} \frac{R_{\text{экв}}}{X_{\text{ф}}} \frac{\pi}{3}} \right)^2} -$$

$$- \frac{E_{\text{д. экв}}}{R_{\text{экв}}} \left(\frac{2}{3} + \frac{X_{\text{ф}}}{\pi R_{\text{экв}}} \frac{2 \operatorname{sh} \frac{R_{\text{экв}}}{X_{\text{ф}}} \frac{\pi}{3}}{1 - 2 \operatorname{ch} \frac{R_{\text{экв}}}{X_{\text{ф}}} \frac{\pi}{3}} \right),$$

где $R_{\text{экв}} = R_2 + R_1/n^2 + 2r_{\text{д}}$ — активное сопротивление элементов выпрямителя, приведенное ко вторичной обмотке трансформатора; R_1 и R_2 — активное сопротивление обмоток; n — коэффициент трансформации; $r_{\text{д}}$ — дифференциальное сопротивление вентиля. При соединении обмоток трансформатора треугольником $X_{\text{ф}}$, $R_{\text{экв}}$ должны быть приведены к эквивалентной звезде; $E_{\text{д. экв}} = U_{\text{д}} + 2U_{\text{пор}}$ — эквивалентная противо-ЭДС; $U_{\text{пор}}$ — пороговое напряжение вентилей; $X_{\text{ф}}$ — усредненное индуктивное сопротивление рассеяния фазы трансформатора.

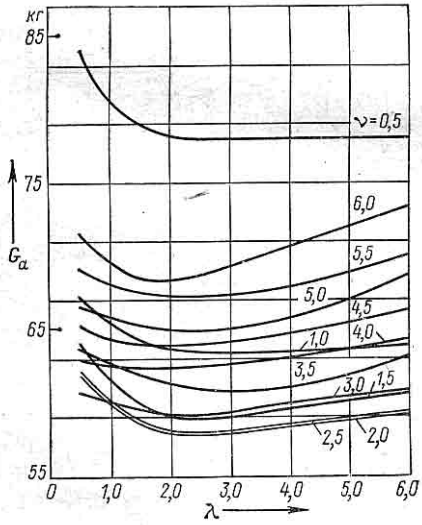


Рис. 9.17. Зависимость массы активных материалов от λ при ν = const

Из формулы для $I_{\text{д}}$ может быть получено выражение для предварительного определения индуктивного сопротивления рассеяния при заданных значениях $U_{\text{д}}$, $I_{\text{д}}$, $U_{\text{х. х}}$. При этом эквивалентное сопротивление $R_{\text{экв}}$ целесообразно принять частью значения $X_{\text{ф}}$. В сварочн-

ных выпрямителях, имеющих принудительную воздушную вентиляцию, с изоляцией обмоток по классу В $R_{экв}$ может достигать в зависимости от мощности выпрямителя 7—15 % индуктивного сопротивления.

Принимая

$$R_{экв}/X_{ф} = a; \quad Z_{экв} = X_{ф}\sqrt{1+a^2},$$

имеем

$$X_{ф} = \frac{1}{I_{д}}\left[\frac{U_{х.х}}{\sqrt{3}\sqrt{1+a^2}} \times \right.$$

$$\times \sqrt{1 - \left(0{,}55\,\frac{E_{д.экв}}{a}\,\frac{\sqrt{1+a^2}}{U_{х.х}}\,\frac{2\,\mathrm{sh}\,a\frac{\pi}{3}}{1-2\,\mathrm{ch}\,a\frac{\pi}{3}}\right)^2} -$$

$$\left. - \frac{E_{д.экв}}{a}\left(\frac{2}{3} + \frac{1}{a\pi}\,\frac{2\,\mathrm{sh}\,a\frac{\pi}{3}}{1-2\,\mathrm{ch}\,a\frac{\pi}{3}}\right)\right].$$

Выпрямители с дросселями насыщения. Формирование падающих внешних характеристик, плавное регулирование сварочного тока могут производиться с помощью дросселя насыщения, включенного во вторичную цепь силового трансформатора. Такая система регулирования сварочного тока имела широкое распространение в сварочной технике в выпрямителях на 400 А и выше наряду с более простой механической системой. Регулирование дросселем насыщения (ДН) привлекало простотой дистанционного управления сварочным режимом и возможностью его стабилизации при колебаниях напряжения сети. В настоящее время применение дросселей насыщения в выпрямителях с падающими характеристиками значительно уменьшилось в связи с появлением тиристорных систем управления.

Выпрямитель ВД-502-2. Схема ВД-502-2 совмещает в известной степени обе эти системы. Обмотка управления ДН питается от тиристорного регулятора, собранного по однополупериодной схеме выпрямления. Выпрямитель имеет дистанционное регулирование сварочного тока с выносного пульта и обеспечивает стабилизацию выходных параметров при колебаниях напряжения питающей сети. В диапазоне 100—500 А ток поддерживается с точностью

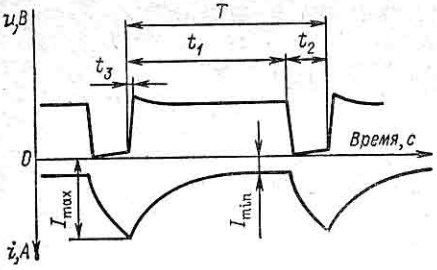


Рис. 9.18. Осциллограмма тока и напряжения дуги при сварке с короткими замыканиями дугового промежутка

T — общее время цикла; t_1 — время горения дуги; t_2 — время короткого замыкания дугового промежутка; t_3 — время восстановления промежутка после взрыва шейки капли; I_{max} — максимальное значение тока при коротком замыкании; I_{min} — минимальное значение тока, предшествующее короткому замыканию

2,5 % при повышении напряжения сети на 5 % и с точностью 5 % при понижении напряжения сети на 10 %. ВД-502-2 собран по трехфазной мостовой схеме выпрямления с использованием вентилей В200. Охлаждение — воздушное принудительное. Технические данные выпрямителя приведены в табл. 9.6.

Однопостовые сварочные выпрямители с жесткими внешними характеристиками. Сварка в среде углекислого газа является в настоящее время одним из наиболее массовых способов механизированной дуговой сварки. В широком диапазоне сварочных режимов перенос электродного металла имеет различный характер. Наиболее характерными, обеспечивающими приемлемое разбрызгивание являются режимы, при которых перенос металла происходит с короткими замыканиями дугового промежутка, и режимы с высокими плотностями тока в электроде, сопровождающиеся мелкокапельным переносом металла без короткого замыкания дугового промежутка. В настоящее время значительное распространение получила сварка с короткими замыканиями дугового промежутка, при которой к источникам питания предъявляется ряд специальных требований. Признаком устойчивости процесса является не постоянство длины дугового промежутка, напряжения и тока дуги, а определенная периодичность изменения всех этих параметров режима сварки. Такой устойчивый процесс может быть разделен на ряд повторяющихся однотипных циклов. На рис. 9.18 представлена типичная осциллограмма тока и напряжения дуги одного такого цикла. Процесс сварки протекает следующим образом.

Тепло, выделяемое дугой после ее возбуждения вслед за разрывом перемычки между электродом и каплей,

быстро оплавляет конец электрода, и дуговой промежуток несколько увеличивается. В процессе горения дуги происходит постепенное увеличение объема капли расплавленного металла и снижение скорости плавления за счет уменьшения отвода тепла в сторону нерасплавленной части электрода. При постоянной скорости подачи электродной проволоки конец электрода приближается к ванне и капля замыкает дуговой промежуток. Начинается перетекание капли в ванну и образование шейки, соединяющей ее с электродом; дуга гаснет, напряжение резко падает, ток короткого замыкания возрастает. С увеличением тока короткого замыкания усиливается его сжимающее действие на каплю металла. Возникающее при этом аксиальное усилие ускоряет переход капли в ванну. При достижении критического максимального тока шейка перегорает со взрывом, напряжение на дуговом промежутке почти мгновенно возрастает до значения, превосходящего установленное значение напряжения сварки. Дуга возбуждается, и процесс повторяется снова. Величины t_2 — время короткого замыкания дугового промежутка, t_3 — время восстановления напряжения после взрыва шейки капли, I_{max} — максимальный ток при коротком замыкании, I_{min} — минимальный ток, предшествующий короткому замыканию, характеризуют в основном динамические свойства источника питания и его способность обеспечивать устойчивый процесс сварки.

Основной причиной разбрызгивания металла при сварке является, таким образом, электрический взрыв перемычки (шейки капли) между электродом и ванной. В связи с этим особо важное значение для протекания процесса сварки с короткими замыканиями дугового промежутка и уменьшения разбрызгивания электродного металла имеет скорость нарастания тока короткого замыкания

$$di/dt = \Delta I_{к.з}/\Delta t_2.$$

Оптимальные значения di/dt зависят от диаметра электродной проволоки, режима сварки и расположения шва в пространстве. Ограничение тока короткого замыкания при сварке в углекислом газе производится несколькими методами: включением индуктивности в сварочную цепь постоянного тока; увеличением крутизны наклона внешней характеристики источника, в частности за счет балластного реостата; комбинированным способом — вклю-

чением в сварочную цепь дросселя с небольшой индуктивностью и изменением наклона внешних характеристик. Однако следует сразу отметить, что ограничение тока короткого замыкания с помощью балластных реостатов не обеспечивает достаточно качественного формирования вертикальных и потолочных швов.

В однопостовых сварочных выпрямителях большое распространение получил способ ограничения тока короткого замыкания за счет включения в сварочную цепь дросселя с воздушным зазором, имеющего, как правило, две ступени индуктивности (ВС-300А, ВДУ-504-1). Комбинированный способ ограничения нашел применение в сварочном выпрямителе ВСЖ-303. Как уже указывалось, необходимая индуктивность в сварочной цепи и соответственно скорость нарастания тока короткого замыкания зависят от диаметра применяемой проволоки и режима сварки.

При сварке проволокой малых диаметров для устойчивого протекания процесса необходимы значительно бóльшая скорость нарастания тока и соответственно меньшая индуктивность в сварочной цепи, чем при сварке толстыми электродными проволоками. Для выпрямителей могут быть рекомендованы следующие значения индуктивности: 150—200 мкГн при сварке проволокой диаметром 0,8—1,2 мм на токах до 200 А во всех пространственных положениях и 400—500 мкГн при сварке проволокой диаметром 1,6 и 2,0 мм на токах до 700 А, а также диаметром 1,2 мм в нижнем положении на токах 200 А и выше. При сварке на токах свыше 700 А индуктивность может быть уменьшена до 150—200 мкГн.

Следует отметить, что ограничение тока короткого замыкания за счет увеличения наклона внешних характеристик выпрямителя, хотя и обеспечивает некоторое снижение разбрызгивания, может привести к неустойчивому процессу сварки короткой дугой с использованием тонких проволок на малых токах при общепринятых напряжениях дуги, характерных для режимов с минимальным разбрызгиванием и небольшой шириной шва.

При сварке в среде углекислого газа целесообразен наклон внешних характеристик 0,01—0,02 В/А.

Значительно повысить стабильность горения дуги при сварке с короткими замыканиями дугового промежутка проволоками диаметром 1,0—1,6 мм, а также снизить минимальный сварочный ток при заданном диаметре элек-

тродной проволоки позволяет введение в сварочную цепь дроссельного устройства, обеспечивающего бесступенчатое регулирование индуктивности в сварочной цепи и получение кратковременных ограниченных пиков тока при коротких замыканиях дугового промежутка каплей расплавленного металла.

В этом случае увеличивается (до 30 %) частота коротких замыканий, облегчается сварка вертикальных и потолочных швов. Сам процесс горения дуги идет при общепринятых наклонах внешних характеристик. При сварке проволокой диаметром 1,2 мм нижний предел сварочного тока, обеспечивающего стабильный сварочный процесс, снижается до 50 А. При сварке в режимах без коротких замыканий дугового промежутка устройство не влияет на сварочный процесс. Дроссельные устройства такого типа применены во всех новых сварочных выпрямителях ВДГ-303, ВДУ-505, ВДУ-506, ВДУ-601.

Однопостовые выпрямители с жесткими внешними характеристиками выпускаются в СССР с различными способами регулирования выходного напряжения: со ступенчатым регулированием за счет изменения числа витков первичных обмоток трансформатора (ВС-300А, ВС-600М), плавно-ступенчатым с помощью дросселей насыщения (ВДГ-303) и трансформаторов с магнитной коммутацией (ВСЖ-303), а также с тиристорным регулированием режима (ВДГ-601 и выпрямители с универсальными внешними характеристиками).

Выпрямители со ступенчатым регулированием выходного напряжения. Эти выпрямители относятся к категории наиболее простых источников питания, получивших значительное распространение. Они состоят из трехфазного понижающего трансформатора с секционированной первичной обмоткой, переключателей ступеней, блока вентилей, дросселя в сварочной цепи. Выпрямительный блок собирается по трехфазной мостовой схеме выпрямления, охлаждение — воздушное принудительное. Существенными недостатками подобных выпрямителей являются необходимость в значительном числе ступеней регулирования, плохое использование активных материалов трансформатора (при работе на максимальной мощности секционированная часть первичной обмотки не используется), отсутствие дистанционного регулирования.

Выпрямитель ВС-300А. Принципиальная электрическая схема переключений первичных обмоток трансфор-

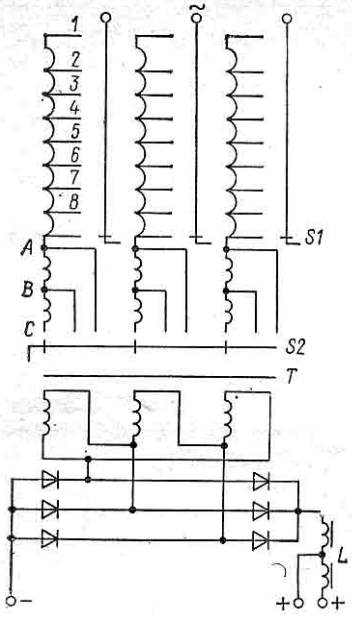


Рис. 9.19. Упрощенная электрическая схема переключений ступеней регулирования сварочного выпрямителя ВС-300А

матора *Т* представлена на рис. 9.19. Выпрямитель имеет три грубые (переключатель *S2*) и восемь плавных ступеней регулирования (переключатель *S1*). В сварочной цепи включен дроссель с индуктивностью 250 мкГн. Технические данные приведены в табл. 9.7.

Выпрямитель ВС-600М. Этот выпрямитель также имеет ступенчатое регулирование выходного напряжения. Общее число ступеней регулирования — 27, число переключателей — 3. Индуктивность дросселя в сварочной цепи 150 и 450 мкГн. Технические данные указаны в табл. 9.7.

Выпрямители с плавно-ступенчатым регулированием режима. *Сварочный выпрямитель ВДГ-303.* Упрощенная электрическая схема выпрямителя приведена на рис. 9.20. Ступенчатое регулирование производится путем изменения коэффициента трансформации силового трансформатора *Т*. Плавное дистанционное регулирование внутри ступени — дросселем насыщения *L1*. Соединению фаз первичной обмотки треугольником с использованием отводов соответствует первая ступень регулирования рабочего напряжения (максимальное напряжение), соединению первичных обмоток треугольником (без отвода) — вторая ступень регулирования, соединению первичных обмоток звездой с использованием отводов — третья ступень регулирования. Переключение ступеней производится трехфазным пакетно-кулачковым переключателем *S1* на три положения. Трехфазный дроссель *L1* выполнен на шести ленточных разрезных магнитопроводах. На каждом магнитопроводе расположены рабочие обмотки *РО* дросселя, включенные последовательно с вентилями силового выпрямительного блока, собранного по трехфаз-

Таблица 9.7

Параметры	ВС-300А	ВС-600М
Номинальный сварочный ток, А	315	630
Номинальный режим работы, ПВ, %	60	
Номинальное рабочее напряжение, В	34	50
Пределы регулирования напряжения, В	16—34	20—50
Пределы регулирования сварочного тока, А	50—315	100—630
Число ступеней регулирования	24	27
Первичная мощность, кВ·А, не более	16	35
КПД, %, не менее	75	83
Габаритные размеры (длина×ширина× × высота), мм	650×600× ×900	1000×700× ×1400
Масса, кг, не более	180	550

ной мостовой схеме выпрямления на кремниевых вентилях В200. Объединенные попарно магнитопроводы охвачены катушками обмоток управления и смещения. Обмотка управления дросселя насыщения *ОУ* питается от перекомпенсированного феррорезонансного стабилизатора напряжения *СН* через выпрямительный блок *VD1* и переменный резистор *R1*. При понижении напряжения сети напряжение на выходе стабилизатора увеличивается и наоборот, что позволяет осуществить частичную компенсацию изменения рабочего напряжения при колебаниях

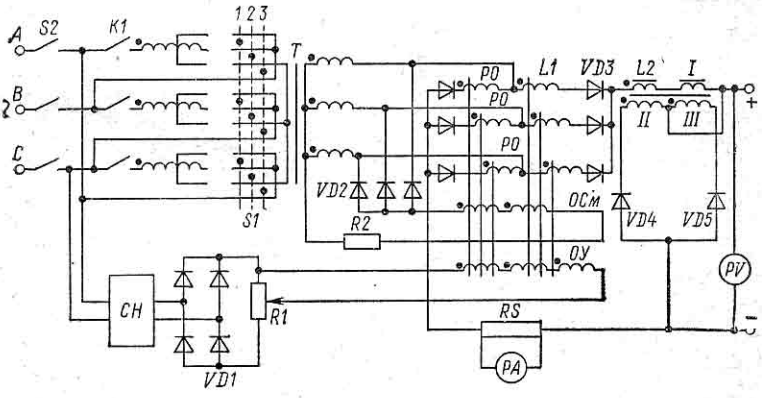


Рис. 9.20. Упрощенная электрическая схема выпрямителя ВДГ-303

напряжения сети. Обмотка смещения *ОСм* получает питание от вторичных обмоток силового трансформатора через выпрямитель *VD2* и токоограничивающий резистор *R2*.

Как уже указывалось выше, в выпрямителе применен специальный дроссель, обеспечивающий повышение стабильности сварочного процесса и бесступенчатое регулирование индуктивности в зависимости от режима сварки. Дроссель *L2* — броневого типа с воздушным зазором, имеет основную рабочую обмотку *I*, включенную последовательно в сварочную цепь, и две вспомогательные обмотки управления *II* и *III*, подключенные через диоды *VD4* и *VD5* к минусовому зажиму выпрямителя. Общая точка обмоток *II* и *III* подключена к плюсовому зажиму. При работе выпрямителя (во время горения дуги) на рабочей обмотке дросселя выделяется переменная составляющая выпрямленного напряжения с частотой $f = 50m$, где m — число фаз выпрямителя. В данном случае $f = 300$ Гц. Указанное напряжение индуктируется в обеих обмотках управления и выпрямляется однофазной двухполупериодной схемой, образованной обмотками и диодами. Выпрямленный ток протекает по обмоткам управления, замыкается через дугу и изменяет при этом индуктивность дросселя при сварке. Значение индуктивности зависит от режима работы выпрямителя. При сварке в режимах малых токов встречное напряжение дуги невелико, ток, непрерывно протекающий в обмотках *II* и *III*, при горении дуги становится больше, дроссель *L2* имеет малую индуктивность. На больших режимах увеличивается запирающее рабочее напряжение дуги, ток во вспомогательных обмотках уменьшается, индуктивность дросселя увеличивается. Таким образом, осуществляется автоматическое изменение индуктивности при изменении режима сварки. Полная индуктивность дросселя у выпрямителя ВДГ-303 составляет 500 мкГн.

Следует отметить, что изменение индуктивности дросселя особенно значительно в выпрямителях с тиристорным регулированием. В этом случае напряжение, наводимое в обмотках управления, и протекающий по ним ток зависят от угла открытия тиристоров и возрастают при сварке в режимах малых токов с ростом пульсации сварочного тока. В режимах больших токов угол открытия тиристоров увеличивается, пульсация и наводимая ЭДС падают, ток в обмотках управления значительно уменьшается. При коротком замыкании дугового промежутка

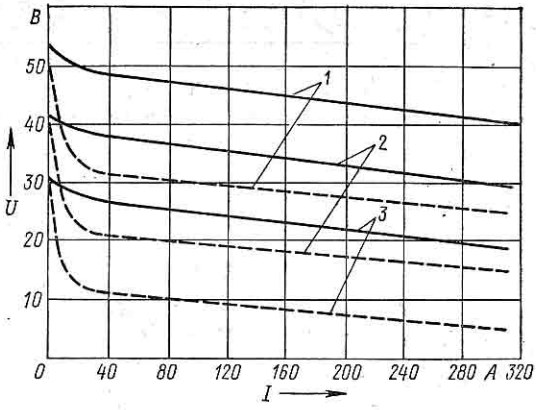


Рис. 9.21. Внешние характеристики выпрямителя ВДГ-303
1, 2, 3 — ступени регулирования

каплей расплавленного металла в основной рабочей обмотке *I* резко возрастает сварочный ток, в обмотках *II* и *III* наводится значительная ЭДС, диод *VD4* закрывается, диод *VD5* открывается. Обмотка *III* обеспечивает резкое снижение индуктивности дросселя и импульс варочного тока в момент начала короткого замыкания. При обрыве капли начинается спадание сварочного тока. ЭДС в обмотках *II* и *III* меняет знак, диод *VD5* закрывается, диод *VD4* открывается. Ток, текущий по вспомогательной обмотке *II* и диоду *VD4*, обеспечивает быстрый перенос энергии, накопленной в дросселе, в сварочную дугу, ликвидируя резкий провал тока после короткого замыкания и обеспечивая дополнительно стабилизацию горения дуги, особенно на малых токах.

Внешние характеристики выпрямителя ВДГ-303 приведены на рис. 9.21.

Сварочный выпрямитель ВДГ-303 имеет нишу для размещения блока управления сварочным полуавтоматом и вспомогательный трансформатор для питания аппаратуры управления полуавтомата и подогревателя газа. Вентиляция — воздушная принудительная. Технические данные ВДГ-303 приведены в табл. 9.8.

Значительное рабочее напряжение позволяет применять выпрямитель при сварке на форсированных режимах и высоколегированной проволокой.

Источник питания ВСЖ-303. Регулирование выходного напряжения осуществляется с помощью специаль-

Таблица 9.8

Параметры	ВДГ-303	ВСЖ-303
Номинальный сварочный ток, А	315	
Номинальный режим работы, ПВ, %	60	
Номинальное рабочее напряжение, В	40	34
Пределы регулирования рабочего напряжения, В	16—40	16—34
Пределы регулирования сварочного тока, А	50—315	
Число ступеней регулирования	3	
Первичная мощность, кВ·А, не более	21	20
КПД, %, не менее	76	
Габаритные размеры, мм	723×593××938	600×650××900
Масса, кг	220	200

ного трансформатора с магнитной коммутацией. Как видно из рис. 9.22, магнитопровод трансформатора имеет два ярма — среднее *СЯ* и верхнее *ВЯ*, магнитное состояние которых может изменяться за счет подмагничивания их постоянным током, создаваемым обмотками управления *ОУ1* и *ОУ2*. В окне трансформатора под средним ярмом расположены катушки первичной обмотки *W1* и основная часть вторичной обмотки *W2*. Часть вторичной обмотки $w_{2р}$, обеспечивающая заданный диапазон регулирования выходного напряжения, расположена между средним и верхним ярмами и соединена с основной вторичной обмоткой последовательно и согласно. При подмагничивании верхнего ярма магнитным потоком обмотки *ОУ1* составляющая основного магнитного потока, сцепленная с обмоткой $w_{2р}$, падает, уменьшаются вторичное фазное напряжение трансформатора и выпрямленное напряжение выпрямителя. В случае подмагничивания

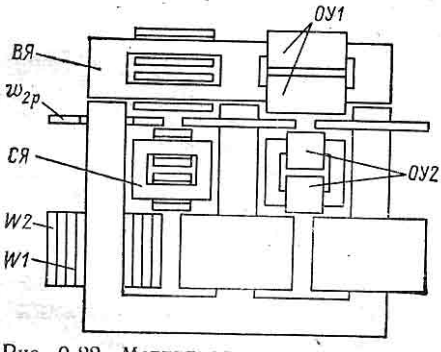


Рис. 9.22. Магнитная система и расположение обмоток выпрямителя ВСЖ-303

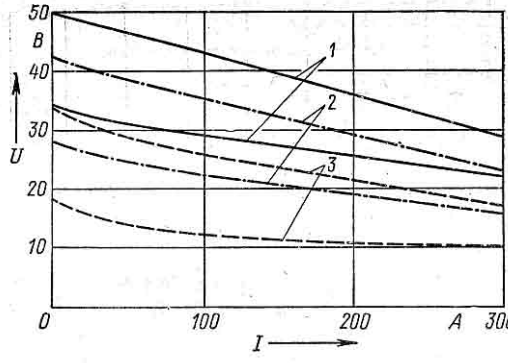


Рис. 9.23. Внешние характеристики выпрямителя ВСЖ-303
1, 2, 3 — ступени регулирования

среднего ярма обмоткой *ОУ2* выходное напряжение выпрямителя возрастает. Таким образом, путем поочередного включения обмоток управления *ОУ1* и *ОУ2* регулируется выходное выпрямленное напряжение. Силовой выпрямительный блок собран по трехфазной мостовой схеме выпрямления. Электронная система управления выпрямителя ВСЖ-303 обеспечивает стабилизацию выходного напряжения при колебаниях напряжения питающей сети и коррекцию наклона внешних характеристик выпрямителя. Как известно, связь между скоростью нарастания тока короткого замыкания di/dt и параметрами сварочной цепи может быть выражена зависимостью

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_{х.х} - iR}{L},$$

где $U_{х.х}$ — напряжение, приложенное к цепи; i — действующее значение тока; R — омическое сопротивление цепи; L — индуктивность цепи.

Следовательно, при наличии некоторой индуктивности представляется возможным в случае плавного раздельного регулирования напряжения холостого хода $U_{х.х}$ и наклона внешних характеристик изменять di/dt и соответственно ток короткого замыкания $I_{к.з}$.

Наличие дополнительного блока коррекции позволяет при работе от источника ВСЖ-303 производить некоторую раздельную настройку режима сварки изменением напряжения холостого хода и наклона внешних характеристик.

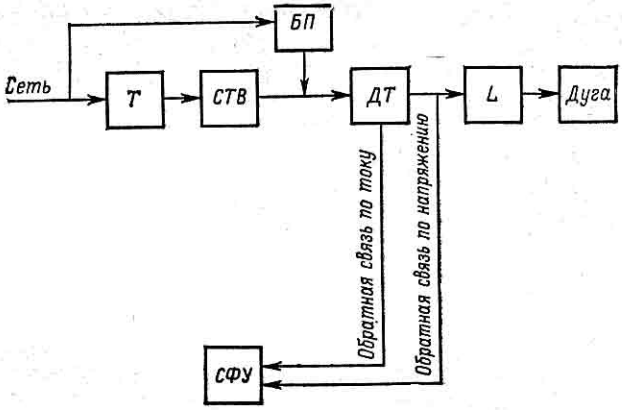


Рис. 9.24. Типовая функциональная схема тиристорного сварочного выпрямителя с универсальными внешними характеристиками

Т — трансформатор; *СТВ* — силовой тиристорный выпрямитель; *ДТ* — датчик тока; *БП* — блок подпитки; *L* — дроссель в цепи выпрямленного тока; *СФУ* — система фазового управления

Индуктивность в сварочной цепи выпрямителя составляет 150 мкГн. Внешние характеристики приведены на рис. 9.23. Наклон внешних характеристик может изменяться от 0,015 до 0,07 В/А. Выпрямитель имеет три ступени регулирования напряжения. Технические данные выпрямителя ВСЖ-303 приведены в табл. 9.8.

Однопостовые тиристорные сварочные выпрямители. Развитие полупроводниковой техники и применение тиристоров в сварочных выпрямителях привели к созданию качественно новых источников питания для дуговой сварки и расширению их номенклатуры. Сочетая в себе функции выпрямления и регулирования, тиристорный регулятор позволил простыми методами решить задачи разработки выпрямителей с универсальными, жесткими и падающими внешними характеристиками, с дистанционным регулированием, стабилизацией режима сварки при колебаниях напряжения сети и программным управлением.

Тиристорные выпрямители представляют собой, как правило, замкнутую систему авторегулирования с обратными связями по току и напряжению. На рис. 9.24 приведена типовая функциональная схема универсального тиристорного сварочного выпрямителя.

Создание выпрямителей с универсальными внешними характеристиками связано с унификацией конструкции силового трансформатора *Т*. Стабильный процесс сварки в углекислом газе тонкими электродными проволоками в различных пространственных положениях может быть обеспечен только при питании от выпрямителей с естественной жесткой внешней характеристикой, выполненных на базе трансформаторов с нормальным рассеянием. В то же время ручную дуговую сварку и сварку под флюсом можно выполнять при падающих характеристиках, полученных на базе трансформаторов с нормальным рассеянием. С учетом этого все тиристорные выпрямители выполняются с силовым понижающим трансформатором, имеющим нормальное рассеяние.

В тиристорных сварочных выпрямителях в зависимости от типоразмера и экономически обоснованного типа тиристора применяются различные многофазные схемы выпрямления. Наиболее целесообразны схемы, обеспечивающие минимальную пульсацию сварочного тока: трехфазная мостовая, двойная трехфазная с уравнительным реактором и шестифазная кольцевая схема выпрямления. Из трехфазных мостовых схем более предпочтительна симметричная, полностью управляемая схема, обеспечивающая по сравнению с полууправляемой схемой (три диода, три тиристора) меньшую пульсацию сварочного тока.

Сварочные выпрямители на токи до 500 А изготовляются по двойной трехфазной схеме с уравнительным реактором. Обеспечивая наилучшее использование вентилей по току, эта схема дает возможность применять наиболее массовые тиристоры Т160 на сравнительно малые номинальные токи. Выпрямители на ток 630 А изготовляются по двойной трехфазной схеме с уравнительным реактором и шестифазной кольцевой схеме, на ток 1250 А — по шестифазной кольцевой схеме выпрямления.

В тиристорных сварочных выпрямителях дроссель в цепи выпрямленного тока *L* необходим не только для ограничения пиков тока короткого замыкания при сварке в среде углекислого газа, ручной дуговой сварке или сварке под флюсом, но и в значительной степени для сглаживания пульсаций выпрямленного тока, величина которых зависит от пределов регулирования. Применяются дроссели с воздушным зазором, имеющие две ступени индуктивности (ВДУ-305, ВДУ-504-1, ВДГ-601, ВДУ-1201),

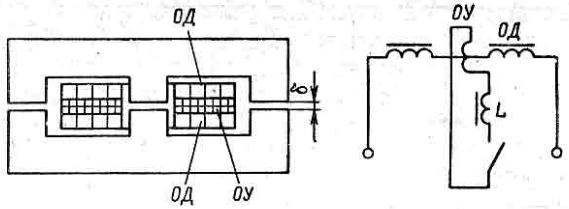


Рис. 9.25. Дроссель в сварочной цепи с дистанционным переключением индуктивности

либо специальные дроссели с двумя обмотками управления и диодами (см. рис. 9.20), обеспечивающие автоматическое изменение индуктивности при сварке.

В выпрямителях со ступенчатым изменением индуктивности на токи 315, 500 и 630 А первая ступень (малая индуктивность) предназначена для сварки тонкой электродной проволокой во всех пространственных положениях, вторая ступень (большая индуктивность) — для сварки толстой электродной проволокой, а также для работы на падающих внешних характеристиках в универсальных выпрямителях. В отдельных случаях в тиристорных сварочных выпрямителях переключение ступеней индуктивности может производиться дистанционно в зависимости от режима сварки. Для этого в основной дроссель с воздушным зазором (рис. 9.25) введена дополнительная обмотка управления *ОУ*, магнитно связанная с силовой обмоткой дросселя *ОД*. Для уменьшения индуктивности обмотка управления замыкается на маломощный вспомогательный дроссель *L*. При работе выпрямителя под нагрузкой в обмотке управления *ОУ* наводится ЭДС, частота которой зависит от схемы выпрямления (300 Гц в выпрямителях, собранных по трехфазной мостовой и шестифазным схемам выпрямления). Значение ЭДС возрастает при сварке в режимах малых токов, для которых характерна более глубокая пульсация тока. При подключении дросселя *L* обмотка управления создает магнитный поток, направленный встречно основному, и индуктивность основного дросселя, особенно при сварке в режимах малых токов, снижается. Число витков обмотки управления выбирается исходя из диапазона регулирования индуктивности.

Подобный дроссель применен в сварочном выпрямителе ВДГ-601 и обеспечивает две ступени индуктивности: 200 и 550 мкГн.

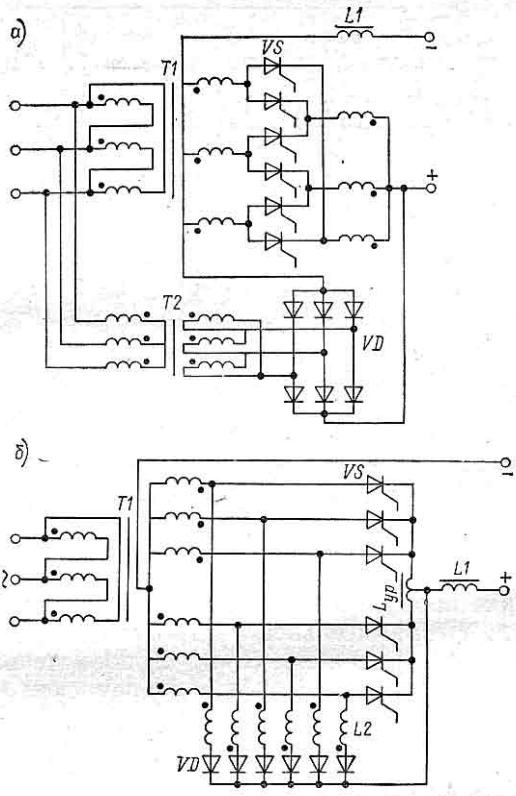


Рис. 9.26. Блок подпитки: *а* — сварочного выпрямителя ВДГ-601; *б* — сварочного выпрямителя ВДУ-305

T1 — силовой трансформатор; *VS* — силовой тиристорный выпрямитель; *T2* — вспомогательный трансформатор с повышенным рассеянием; *VD* — выпрямительный блок подпитки; *L1* — дроссель в сварочной цепи; *L2* — дроссель блока подпитки; $L_{ур}$ — уравнительный реактор

С раширением пределов регулирования пульсация выпрямленного тока значительно возрастает, что может привести, особенно при сварке в вертикальном положении, к ухудшению сварочных качеств и нарушению устойчивости процесса.

Для уменьшения пульсации выпрямленного напряжения источники питания для сварки в среде углекислого газа могут выполняться с двумя диапазонами регулирования за счет переключения первичной обмотки силового трансформатора с соединения звездой на треугольник.

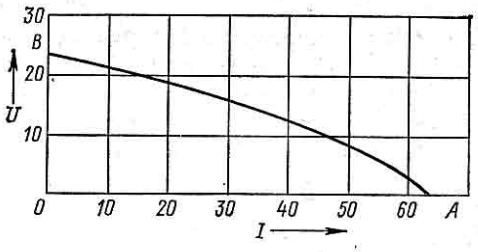


Рис. 9.27. Внешняя характеристика блока подпитки сварочного выпрямителя ВДГ-601

Такой способ применен в выпрямителе на 500 А типа ВДУ-504-1. Наличие двух диапазонов регулирования несколько повышает и коэффициент мощности выпрямителя за счет улучшения в этом случае коэффициента искажений. Однако в большинстве случаев, особенно в источниках питания с программируемым режимом работы как при жестких, так и падающих характеристиках, целесообразно иметь один широкий диапазон регулирования. При этом для снижения глубины пульсации и обеспечения непрерывности сварочного тока параллельно блоку тиристоров (до дросселя) может включаться дополнительное выпрямительное устройство, выполняющее функции блока подпитки (БП). Дополнительный блок собирается на диодах с использованием схем выпрямления, обеспечивающих шестифазную пульсацию, и имеет падающие внешние характеристики.

В настоящее время применяются две системы подпитки. Блок питания выпрямителя ВДГ-601 (рис. 9.26, *а*) состоит из трехфазного трансформатора *Т2* с падающими характеристиками (разнесенные первичные и вторичные обмотки) и выпрямительного блока *VD*, собранного по трехфазной мостовой схеме. Сглаживание пульсаций происходит не только благодаря работе собственного блока подпитки, но и за счет использования выпрямительного моста в качестве обратного диода в сочетании с силовым дросселем в сварочной цепи.

На рис. 9.27 приведена внешняя характеристика блока подпитки сварочного выпрямителя ВДГ-601, имеющего только жесткие внешние характеристики. К преимуществу схемы следует отнести возможность использования блока с ограниченным по значению напряжением холостого хода, близким к таковому при сварочных режимах на минимальных токах.

В схеме блока подпитки выпрямителя ВДУ-305 (рис. 9.26, *б*) падающие характеристики получаются за счет применения трехфазного дросселя с воздушным зазором *L2*. В схеме использована простая шестифазная схема выпрямления *VD*. При этом уравнительный реактор $L_{ур}$ двойной трехфазной схемы выпрямления, по которой собран тиристорный блок, следует включать не в анодные, а в катодные цепи тиристоров. В противном случае нормальная работа схемы искажается, внешние жесткие характеристики выпрямителя имеют повышенный наклон, что отрицательно сказывается на стабильности сварки короткой дугой в среде углекислого газа в режимах малых токов.

Следует отметить, что дроссели с двумя дополнительными обмотками и диодами (см. рис. 9.20) обеспечивают стабильную сварку в среде углекислого газа в достаточно широких пределах без введения блока подпитки. В этом случае вследствие автоматического снижения индуктивности в момент касания капли расплавленного металла свариваемого изделия стабильный процесс сварки в режимах малых токов обеспечивается при большей индуктивности дросселя, чем в случае применения дросселя с двумя ступенями индуктивности. При сварке на падающих внешних характеристиках дополнительные обмотки управления дросселя отключаются.

Для получения падающих и жестких внешних характеристик с заданной крутизной наклона в выпрямителях используется обратная связь по току. Основным элементом обратной связи является датчик тока (ДТ), обеспечивающий необходимое изменение напряжения на его выходе, пропорциональное значению сварочного тока. В качестве чувствительных элементов датчиков тока, осуществляющих обратную связь, могут служить магнитный усилитель, трансформаторы тока, включаемые на стороне низкого напряжения силового трансформатора последовательно с вентилями, интегральные операционные усилители. Магнитные усилители на тороидальных магнитопроводах в течение длительного времени используются в источниках питания на токи до 500 А (ВДУ-305, ВДУ-504-1).

Как видно из рис. 9.28, обмоткой управления магнитного усилителя *A1* служит сварочный провод, пропущенный через окно магнитопровода. Рабочие обмотки усилителя *A1* включены в цепь однофазного выпрямитель-

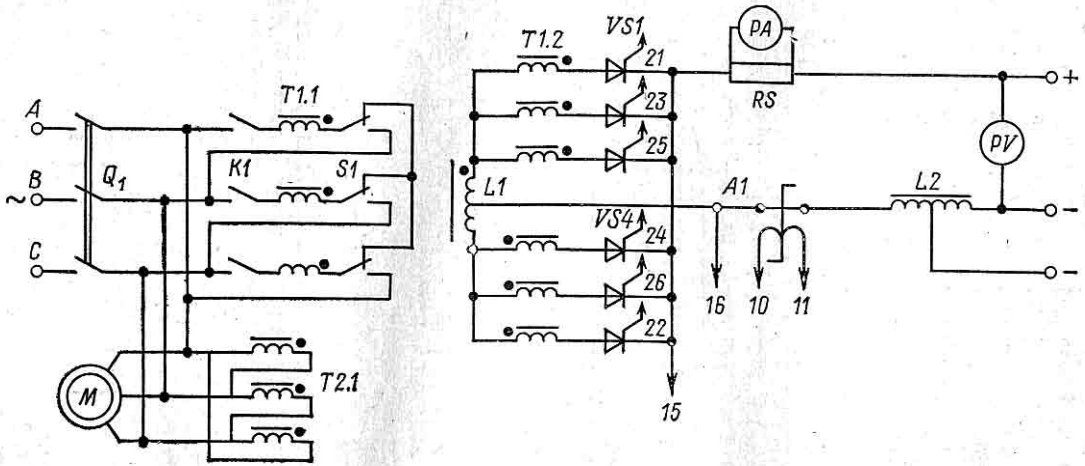
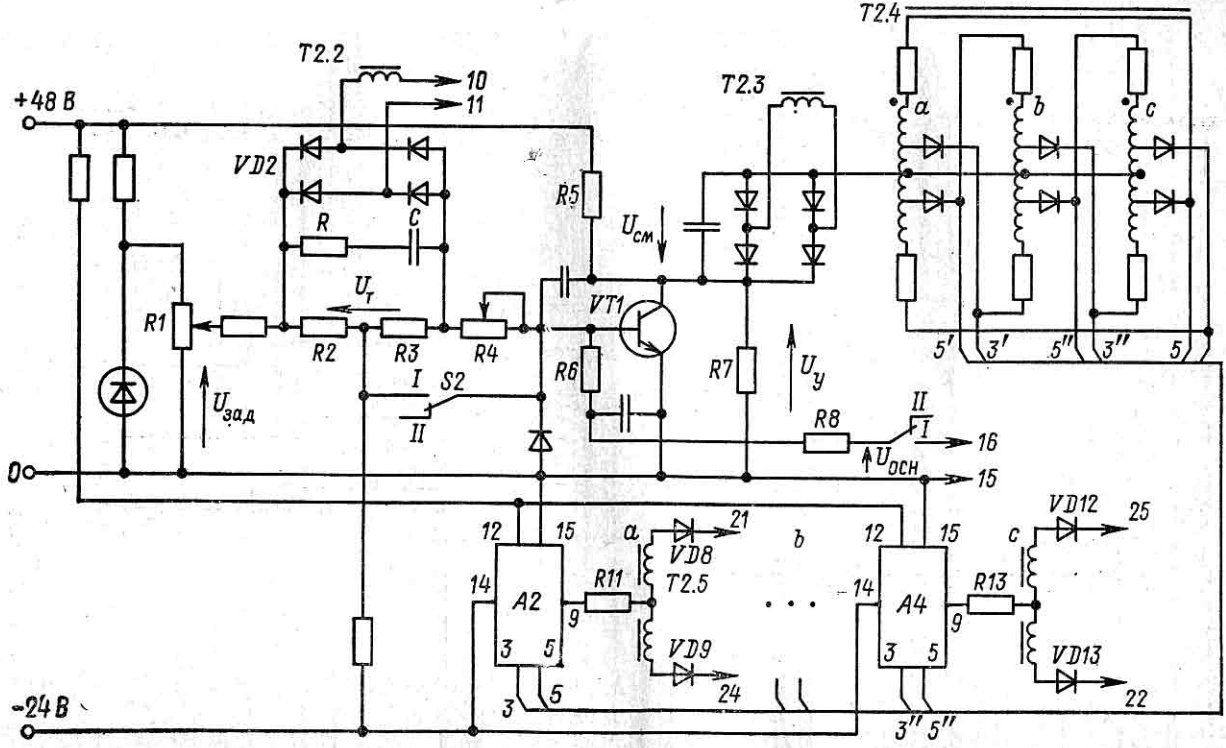


Рис. 9.28. Упрощенная принципиальная электрическая схема сварочного выпрямителя ВДУ-504-1

S — переключатель вида характеристик. Положение *I* — жесткие внешние характеристики; *II* — падающие внешние характеристики


+48 В
0
-24 В
T2.2
10
11
VD2
R
C
R5
T2.3
T2.4
a
b
c
$U_{см}$
$U_г$
R1
R2
R3
R4
VT1
R6
R7
$U_у$
$U_{зад}$
I
S2
II
R8
II
I
16
$U_{ОСН}$
15
5'
3'
5''
3''
5
12
15
14
A2
9
3
5
R11
T2.5
21
VD8
VD9
24
A4
VD12
25
R13
VD13
22
3''
5''

ного моста *VD2* на вторичное напряжение трансформатора *T2* (обмотка *T2.2*). При таком соединении обмоток магнитный усилитель работает в режиме вынужденного намагничивания. Для него характерна прямоугольная форма кривой переменного тока, а выпрямленное напряжение легко поддается сглаживанию. Сигнал обратной связи, пропорциональный сварочному току, $U_т$ снимается с резисторов *R2* и *R3*, включенных на выходе выпрямителя.

Однако в новых тиристорных выпрямителях, схемы управления которых разработаны с применением интегральных микросхем, а также в выпрямителях на большие токи (ВДУ-1201) датчиками тока являются операционные усилители. Высокий коэффициент усиления (50 000 и более) позволяет обеспечить высокую стабильность параметров микросхем за счет введения отрицательной обратной связи. В сварочных выпрямителях коэффициент усиления, обеспечивающий устойчивую работу схемы при использовании операционных усилителей в качестве датчиков тока, работающих в сочетании с шунтом на 75 мВ, невелик и составляет не более 100. При этом коэффициент усиления не зависит от разброса параметров микросхемы и определяется практически коэффициентом обратной связи и разбросом сопротивлений резисторов:

$$k_{о.с} = k\,(1 + k\beta),$$

где $k_{о.с}$ и k — коэффициенты усиления операционного усилителя соответственно с обратной связью и без нее; β — коэффициент передачи цепи обратной связи, показывающий, какая часть суммарного выходного сигнала подается на вход усилителя.

Высокую стабильность параметры микросхем имеют и при изменении климатических характеристик внешней среды. Наличие в операционных усилителях прямого и инверсного входов, обеспечивающих совместно с двухполярным питанием изменение знака выходного сигнала, значительно расширяет возможности схем управления выпрямителей.

На рис. 9.29 приведен датчик тока, собранный на операционном усилителе *A*. Инверсный вход (—) усилителя соединен через резистор малого сопротивления *R1* с общим выводом схемы, прямой вход (+) — через резистор *R2* с шунтом. Усилитель питается напряжением $+U_п$ и $-U_п$. На выходе усилителя образуется отрицательное

относительно общего вывода напряжение $U_т$. Коэффициент усиления усилителя в полосе равномерного усиления

$$k_{о.с} = 1 + \beta = 1 + R_3/R_1.$$

Конденсатор *C1* совместно с резистором *R4* осуществляют частотную коррекцию характеристик усилителя, конденсаторы *C2* и *C3* обеспечивают устойчивость его работы и помехозащищенность в процессе сварки.

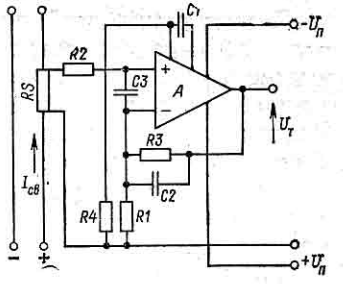


Рис. 9.29. Датчик тока с использованием операционного усилителя

Основным элементом сварочного выпрямителя, определяющим его надежность и ремонтоспособность в эксплуатации, является система фазового управления тиристорами (СФУ).

В настоящее время промышленность выпускает сварочные выпрямители с двумя системами фазового управления: транзисторной, каналы управления которой выполнены с использованием стандартных логических элементов «Логика» Т-404, и новой системой управления, разработанной с применением интегральных микросхем. СФУ с логическими элементами использована в выпрямителях ВДУ-504, а также ВДУ-504-1, ВДГ-601, ВДУ-1201 и т. д. СФУ на базе интегральных микросхем — в новых выпрямителях ВДУ-505, ВДУ-506, ВДУ-601. Обе СФУ выполнены по принципу вертикального управления.

Рассмотрим СФУ на базе транзисторных логических элементов. С учетом возможного значительного разброса параметров транзисторных элементов схема выполнена с тремя каналами фазового управления. Каждый канал обеспечивает подачу импульсов управления на два противофазных тиристора, что значительно снижает их асимметрию и обеспечивает равномерную загрузку тиристоров во всех режимах, особенно у выпрямителей, построенных по двойной трехфазной схеме с уравнительным реактором. Подобная система фазового управления обеспечивает получение импульсов шириной до 90°. СФУ в сочетании со звеньями обратной связи имеет достаточное быстродействие и обеспечивает необходимые сварочные качества выпрямителей.

Рассмотрение всей системы управления тиристорами целесообразно применительно к массовому сварочному выпрямителю на 500 А типа ВДУ-504-1, выполненному по двойной трехфазной схеме с уравнительным реактором. Трехканальная система фазового управления выпрямителя (см. рис. 9.28) состоит из следующих основных узлов: входного устройства, фазосдвигающего устройства, трех усилителей *А2—А4* и трех устройств формирования импульсов.

Входное устройство включает в себя вторичные обмотки вспомогательного трансформатора *Т2.4* (*а*, *b*, *c*), диоды и резисторы. Части обмоток между анодами диодов образуют шестифазную звезду и формируют синхронизированное с сетью шестифазное опорное напряжение. В то же время каждая вторичная обмотка является разрешающей и подключается к обмоткам опорного напряжения через соответствующие диоды и резисторы. Напряжение на разрешающей обмотке опережает на 60° соответствующее опорное напряжение. Благодаря такому включению время прохождения тока по основной обмотке будет определяться проводящим полупериодом напряжения соответствующей разрешающей обмотки. В схему фазового управления из входного устройства подается шесть отрезков синусоидального напряжения длительностью примерно 180°, форма которых приведена на рис. 9.31.

Фазовый сдвиг управляющих импульсов относительно фазы напряжения сети производится при сравнении опорного напряжения с выпрямленным, поступающим с фазосдвигающего устройства. Напряжение на выходе фазосдвигающего устройства является суммой двух встречно включенных напряжений: постоянного напряжения смещения $U_{см}$ (обмотка *Т2.3*) и напряжения $U_у$, снимаемого с резистора *R7* и регулируемого промежуточным усилителем на транзисторе *VT1*. Напряжение смещения введено для расширения диапазона регулирования фазы управляющих импульсов. Напряжению $U_у \approx 0$ соответствует полнофазное открытие силовых тиристоров, напряжению $U_у \approx 2U_{см}$ — почти полное их закрытие. В цепи базы транзистора *VT1* действуют два напряжения: стабилизированное напряжение задания $U_{зад}$ и встречное напряжение обратной связи. При работе на падающих внешних характеристиках действует обратная связь по току $U_{ост}$ ($U_т$). В качестве датчика тока исполь-

зуется магнитный усилитель *A1*. Частичное сглаживание сигнала обратной связи производится цепочкой *RC*, параметры которой подобраны с учетом быстродействия системы. При холостом ходе выпрямителя напряжение $U_т$ отсутствует, транзистор *VT1* открыт и насыщен током задания, $U_у$ близко к нулю. При увеличении сварочного тока напряжение $U_т$ возрастает, транзистор выходит из режима насыщения, напряжение $U_у$ увеличивается, фаза открытия тиристоров и напряжение на выходе выпрямителя уменьшаются. Крутизна наклона характеристик задается резистором *R4*. Стабилизированное напряжение задания определяет значение сварочного тока и обеспечивает в совокупности с замкнутой системой регулирования стабилизацию режима при колебаниях напряжения сети.

При работе на жестких внешних характеристиках вводится обратная связь по напряжению нагрузки $U_{осн}$. Напряжение обратной связи поступает на транзистор *VT1* с выходных зажимов выпрямителя (до сглаживающего дросселя *L2*) через делитель *R6* и *R8*. Сигнал обратной связи сглаживается с учетом необходимой динамики системы. Одновременно с обратной связью по напряжению действует небольшая обратная связь по току, снимаемая с резистора *R2*, позволяющая задать необходимый наклон жестких внешних характеристик. Резисторы *R3* (основная обратная связь по току) и *R4* при жестких внешних характеристиках зашунтированы. Обратная связь по напряжению обеспечивает и стабилизацию режима при колебаниях напряжения сети. Отрицательный, изменяющийся по фазе сигнал с входного и фазосдвигающего устройств поступает на входы усилителей *A2—A4* (зажимы *3* и *5* на рис. 9.28), являющиеся усилительными элементами «Логика» Т-404.

С учетом того, что каждый усилитель обеспечивает работу двух противофазных тиристоров, на вход усилителя подаются два сигнала, образованные противофазными опорными напряжениями. Выходной транзистор логического элемента открыт дважды за период, длительность его открытия зависит от напряжения $U_у$. Устройство формирования управляющих импульсов содержит обмотки трансформатора *T2.5* (рис. 9.28 и 9.30), диоды *VD8—VD13*, токоограничивающие резисторы *R11—R13* и транзисторный ключ, в качестве которого используется выходной транзистор усилителя. Управление тиристорами

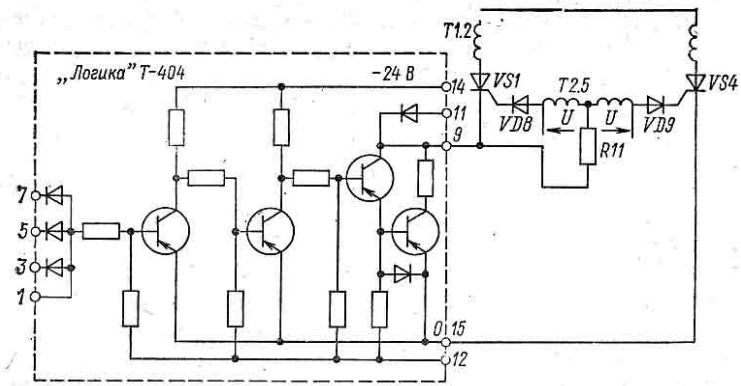


Рис. 9.30. Принципиальная схема устройства формирования управляющих импульсов сварочного выпрямителя ВДУ-504-1

производится импульсами, являющимися частью полуволны синусоиды. Для их создания используется двухполупериодный выпрямитель с нулевым выводом (диоды *VD8*, *VD9*, обмотка трансформатора *T2.5* на рис. 9.30), нагрузкой которого в фазных цепях являются управляющие электроды противофазных тиристоров *VS1*, *VS4*. В диагональ выпрямителя включен эмиттерно-коллекторный переход выходного транзистора логического элемента и последовательно с ним токоограничивающий резистор *R11*. Фаза включения тиристоров определяется выходным транзистором усилителя. При подаче на один из входов логического элемента отрицательного сигнала происходит его переключение, открывается выходной транзистор, замыкая цепь нагрузки двухполупериодного выпрямителя. Ток нагрузки проходит через токоограничивающий резистор и управляющий электрод тиристора, находящегося в плече выпрямителя и имеющего в данный полупериод положительное напряжение. Момент срабатывания транзисторно-релейного элемента определяет фазу включения тиристоров в разные полупериоды напряжения питания. Напряжение на обмотках трансформатора должно находиться в фазе с анодным напряжением своего тиристора.

На рис. 9.31 приведены диаграмма регулирования выходного напряжения одним из тиристоров при различных значениях напряжения задания, форма входного сигнала, подаваемого на логический элемент, и форма сигнала управления тиристором.

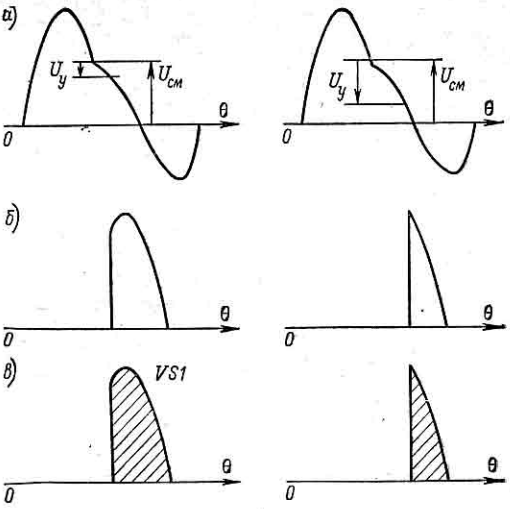


Рис. 9.31. Диаграмма регулирования выходного напряжения: *а* — сигнал на входе логического элемента; *б* — сигнал управления тиристором с однополупериодного выпрямителя; *в* — анодное напряжение силового тиристора

Управление тиристорами полуволной синусоиды с углом регулирования α вместо прямоугольных импульсов создает некоторые особенности расчета действующего напряжения обмотки *T2.5* вспомогательного трансформатора. Значение напряжения определяется с учетом двух ограничений: при минимальном значении угла регулирования $\alpha = \alpha_{min}$ амплитуда фронта сигнала управления должна обеспечивать надежное зажигание всех тиристоров данного типа в заданном диапазоне температуры окружающей среды; мощность потерь в цепи управления тиристоров при $\alpha \geqslant \alpha_{min}$ не должна превышать допустимых значений $P_{доп}$. В каталогах на тиристоры значения $P_{доп}$ приведены для прямоугольных импульсов при заданной скважности Q. Поэтому синусоидальный сигнал управления необходимо заменить прямоугольным той же скважности и мощности. Расчет цепи управления тиристоров при синусоидальном напряжении управления дан в главе восьмой. Диаграммы управления тиристорами приведены в справочной литературе.

В сварочных выпрямителях, собранных по шестифазной кольцевой схеме выпрямления (ВДУ-1201, ВДГ-601),

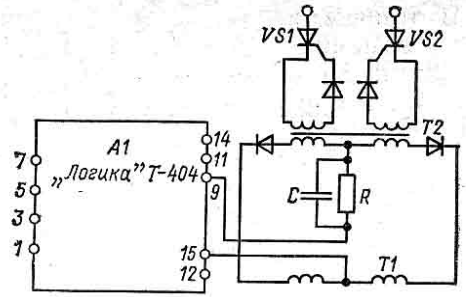


Рис. 9.32. Принципиальная схема устройства формирования управляющих импульсов сварочных выпрямителей, содержащего разделительный трансформатор (ВДУ-1201, ВДГ-601)

устройство формирования управляющих импульсов должно содержать дополнительно разделительный импульсный трансформатор. На рис. 9.32 приведена принципильная схема устройства. Обмотки вспомогательного трансформатора *Т1* и первичные обмотки разделительного трансформатора *Т2* образуют двухполупериодный выпрямитель с нулевым выводом. Ко вторичным обмоткам разделительного трансформатора подключены управляющие электроды противофазных тиристоров. Устойчивая работа кольцевой схемы выпрямления может происходить и при узких импульсах управления тиристорами. В связи с этим для снижения мощности управления в диагональ выпрямительного моста включены токоограничивающий конденсатор *С* и разрядный резистор *R*. В качестве ключа по-прежнему используется выходной транзистор логического элемента усилителя *А1*. При открытии транзистора цепь выпрямителя замыкается, происходит заряд конденсатора *С*, импульсы зарядного тока со вторичных обмоток разделительного трансформатора подаются на управляющие электроды тиристоров.

Рассмотрим вновь разработанную систему управления тиристорных сварочных выпрямителей, выполненную с использованием интегральных микросхем. Как и в предыдущем случае, угол регулирования тиристоров относительно напряжения питающей сети определяется напряжением управления $U_у$, подаваемым на вход блока формирователя импульсов управления тиристорами. Структурная схема системы управления применительно к выпрямителям типа ВДУ-506 и ВДУ-601 приведена на

рис. 9.33. В отличие от этой схемы у выпрямителя ВДУ-505 имеется дополнительный датчик тока, присоединенный непосредственно к шунту выпрямителя *RS* (см. рис. 9.29). Система управления представляет собой систему автоматического регулирования с обратными связями по току *ОСТ* и напряжению *ОСН*. Падающие внешние характеристики (*П*) обеспечиваются отрицательной обратной связью *ОСТ*, жесткие (*Ж*) — включением обратной связи *ОСН*, которая действует совместно с обратной связью *ОСТ*. Для улучшения стабилизации режима сварки при колебаниях напряжения питающей сети предусмотрена дополнительная обратная связь по сети *ОСС*. Напряжение управления формируется узлом — формирователем напряжения управления *ФНУ*, на вход которого поступают напряжение задания $U_{зад}$ с узла задания режима *УЗР* и сигналы обратных связей.

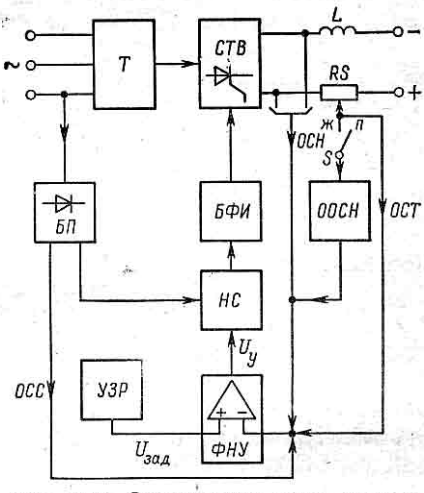


Рис. 9.33. Структурная схема системы управления сварочных выпрямителей ВДУ-506 и ВДУ-601

Импульсы управления силовыми тиристорами создаются блоком формирования импульсов *БФИ* и поступают на силовой тиристорный выпрямитель *СТВ*.

Блок питания обеспечивает получение напряжений, необходимых для работы системы фазового управления.

Для улучшения зажигания дуги при сварке в среде углекислого газа на жестких внешних характеристиках в схему введен специальный дополнительный узел ограничения действия обратной связи по напряжению *ООСН*.

Блок *БФИ* выполнен по традиционной шестиканальной системе фазового управления. Управление тиристорами производится импульсами прямоугольной формы. На вход блока *БФИ* поступает шесть сдвинутых между собой на 60° напряжений синхронизации *НС* с трансформатора блока питания *БП*. Каждый канал блока *БФИ*

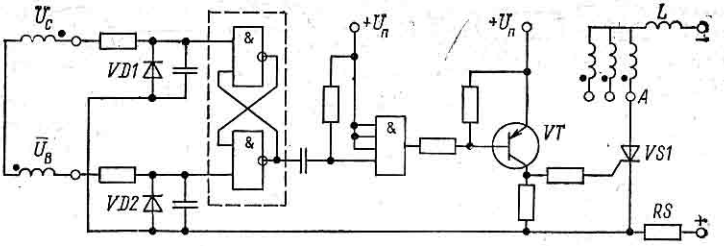


Рис. 9.34. Принципиальная электрическая схема формирования импульсов управления выпрямителей

состоит из формирователя импульсов в виде триггера, промежуточного согласующего усилителя-формирователя, оконечного транзисторного каскада усиления.

Электрическая схема формирования импульсов одним каналом блока *БФИ* приведена на рис. 9.34. Для управления тиристором *VS1*, включенным в фазе *A*, используются два напряжения: U_C, синхронизированное с напряжением фазы *C*, и $\overline{U}_B$, синхронизированное с напряжением, находящимся в противофазе с напряжением фазы *B* питающей сети. Каждое из этих напряжений поступает на диоды *VD1* и *VD2*, срезающие напряжение отрицательной полярности. Положительные пульсирующие напряжения, сдвигутые на 60°, подаются на входы триггера, собранного на двух логических элементах И—НЕ серии К511ЛА1. Элементы имеют пороговое напряжение срабатывания $U_{пор} \approx 7$ В. Следовательно, любой сигнал на входе элемента, меньший этого значения, соответствует логическому 0, а больший этого значения — логической 1.

Процесс формирования импульса на выходе триггера дан на рис. 9.35 для случая $U_у = 0$. В начальный момент времени напряжения U_C и $\overline{U}_B$ меньше $U_{пор}$; следовательно, на обоих входах триггера сигналы равны нулю, а на выходе имеется сигнал 1. Через 60° после начала отсчета времени напряжение U_C превысит пороговое значение и станет равным 1, однако состояние триггера при этом не изменится. Через 120° (точка C_0) напряжение U_C станет меньше $U_{пор}$, а $\overline{U}_B$ достигнет $U_{пор}$. На выходе триггера появится сигнал 0. Такое состояние будет сохраняться до тех пор, пока напряжение U_B не упадет ниже порогового значения (точка B_0). Это произойдет

через 180°. Поскольку в этом случае на обоих входах будут нулевые сигналы, то на выходе появится 1. Цикл повторяется сначала. Из рис. 9.35 видно, что нулевой уровень на выходе триггера длится 60°, что равно углу сдвига между фазами напряжений U_C и $\overline{U}_B$. Полученные на выходе триггера импульсы управления поступают на согласующий усилитель, который представляет собой логический элемент И с открытым коллекторным входом (К511ЛИ1). Усиленные импульсы подаются на оконечный транзисторный каскад *VT* (рис. 9.34), где дополнительно усиливаются и инвертируются. «Нулевые» импульсы шириной 60° становятся «единичными» импульсами управления тиристорами. Как видно из рис. 9.35, нулевой сигнал на выходе триггера, а соответственно импульс управления тиристором появляется одновременно с началом положительной полуволны анодного напряжения фазы *A*. Поэтому тиристор *VS1* в фазе *A* открывается сразу. Угол его регулирования $\alpha = 0$, что соответствует максимальному значению выпрямленного напряжения. При увеличении напряжения управления $U_у$ интервал нулевого сигнала на выходе триггера сместится вправо. Импульс включения тиристора сформируется при $\alpha > 0$, тиристор будет открыт в течение $180° - \alpha$. Выпрямленное напряжение уменьшится. Схема обеспечивает изменение угла регулирования тиристоров от 0 до 180°. Управление остальными тиристорами происходит аналогично.

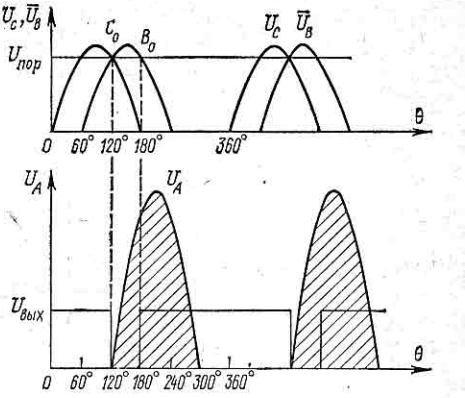


Рис. 9.35. Диаграмма формирования импульса управления

На рис. 9.36 приведена упрощенная принципиальная электрическая схема блока, состоящая из узлов задания режима, формирования напряжения управления и ограничения обратной связи по напряжению. Схема включает в себя обратные связи по напряжению, току и питающей сети.

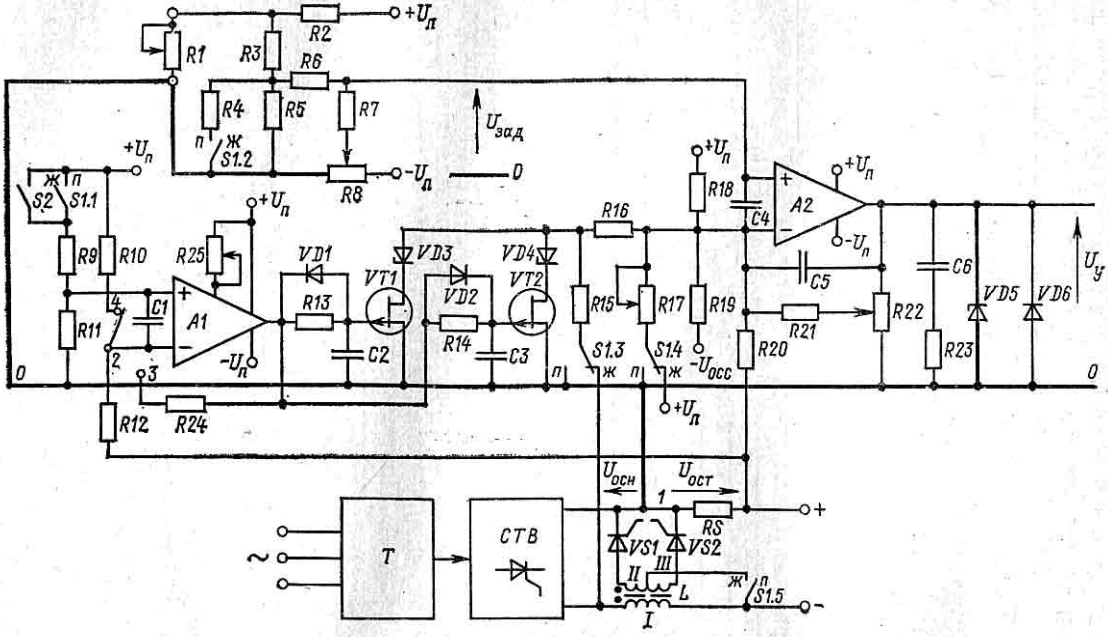


Рис. 9.36. Принципиальная электрическая схема узлов задания режима, формирования напряжения управления и ограничения обратной связи по напряжению выпрямителей ВДУ-505, ВДУ-506 и ВДУ-601

Напряжение $U_у$, которым определяется степень открытия тиристоров и режим сварки, снимается с выхода операционного усилителя *A2*, входящего в узел формирования напряжения управления. Значение $U_у$ устанавливается напряжением задания $U_{зад}$, подаваемым на неинвертирующий вход усилителя *A2*. Узел задания режима является сложным потенциометром, обеспечивающим необходимый диапазон изменения $U_{зад}$.

Для обеспечения минимального напряжения на выходе усилителя *A2* с резистора *R8* снимается компенсирующий отрицательный потенциал. Регулировкой резистора *R8* производится подстройка максимального режима при работе выпрямителя на падающих внешних характеристиках (П). Изменение режима сварки производится регулировкой резистора *R1*. Увеличение сопротивления резистора *R1* приводит к возрастанию положительного напряжения на неинвертирующем входе, увеличению $U_у$ и уменьшению параметров режима. Уменьшение сопротивления резистора *R1* действует в обратном направлении. Для получения необходимого диапазона изменения $U_{зад}$ при работе на жестких и падающих характеристиках при неизменном сопротивлении резистора *R1* предусмотрено переключение резисторов в зависимости от вида характеристик (переключатель *S1*).

Узел формирования напряжения управления, построенный на операционном усилителе *A2*, осуществляет суммирование напряжений задания, всех внешних и корректирующих связей. Сигнал обратной связи по току $U_{ОСТ}$ снимается с шунта *RS* и подается на инвертирующий вход усилителя через резистор *R20*. Увеличение тока сварки приводит к увеличению отрицательного потенциала на входе усилителя, происходит увеличение $U_у$ и снижение параметров режима. Сигнал обратной связи по напряжению $U_{ОСТ}$ снимается с выхода блока тиристоров и дополнительно подается при работе на жестких внешних характеристиках через резисторы *R15* и *R16* на инвертирующий вход усилителя.

При жестких внешних характеристиках (Ж) действие обратной связи по напряжению преобладает над действием обратной связи по току. При снижении напряжения на выходе выпрямителя под действием нагрузки или уменьшении напряжения сети уменьшается отрицательный сигнал $-U_{ОСН}$. Напряжение $U_у$ снижается, и напряжение на выходе выпрямителя увеличивается. Для

улучшения стабилизации режима сварки при колебаниях напряжения сети на инвертирующий вход усилителя *A2* подается через резистор *R19* напряжение $-U_{ОСС}$ и через резистор *R18* стабилизированное напряжение. При номинальном напряжении сети суммарный потенциал на входе усилителя равен 0, в случае повышения напряжения сети значение $-U_{ОСС}$ увеличивается, $U_у$ уменьшается, выходное напряжение выпрямителя снижается.

При работе на жестких внешних характеристиках к инвертирующему входу усилителя *A2* через резитор *R17* подается дополнительное напряжение $+U_п$. Регулировкой резистора *R17* обеспечивается настройка максимального режима при работе на жестких внешних характеристиках в положении подвижного контакта резистора *R1*, соответствующем максимальному режиму при работе на падающих характеристиках.

Коэффициент передачи усилителя *A2* определяется собственной регулируемой жесткой обратной связью через резистор *R21*. Значение коэффициента передачи определяет крутизну наклона падающих внешних характеристик. Регулировкой резистора *R21* устанавливается заданный ток короткого замыкания при номинальном режиме работы.

Стабилитрон *VD5* ограничивает максимальный уровень напряжения $U_у$, снимаемого с усилителя *A2*. Диод *VD6* предназначен для ограничения минимального уровня $U_у$.

Для исключения колебательных процессов усилитель *A2* охвачен гибкой обратной связью через конденсатор *C5*. Конденсаторы *C1* и *C4* защищают входы усилителей от случайных электромагнитных наводок.

При сварке в углекислом газе с постоянной скоростью подачи электродной проволоки первоначальное зажигание дуги, особенно в режимах с малой и средней плотностью тока в электроде, затруднено и происходит после нескольких повторных ее возбуждений.

Одной из основных причин медленного образования дугового промежутка являются недостаточные амплитуда и скорость нарастания тока в момент соприкосновения электродной проволоки с изделием, что вызвано главным образом наличием значительной индуктивности в сварочной цепи выпрямителя. Для быстрого создания дугового промежутка в месте контакта «электрод—изделие» импульс тока должен быть значительной амплитуды и не должен уменьшаться в течение всего времени образова-

ния дугового промежутка. Напряжение холостого хода большинства выпрямителей близко к рабочему в процессе сварки и не способно создать значительный импульс тока в момент зажигания.

Для улучшения зажигания напряжение холостого хода должно быть высоким и снижаться по заданной программе. В этом случае ток короткого замыкания будет определяться повышенной мощностью по сравнению с последующим рабочим режимом. Значительные импульсы тока короткого замыкания необходимы и при повторных зажиганиях в случае выполнения вертикальных швов. Однако с учетом того, что конец электродной проволоки был предварительно разогрет и остывает постепенно, напряжение холостого хода (амплитуда тока) должно увеличиваться плавно и до меньшего значения, чем при первоначальном возбуждении дуги. Для обеспечения указанных целей схема выпрямителя (рис. 9.33 и 9.36) имеет узел ограничения действия обратной связи по напряжению, обеспечивающий повышенное напряжение холостого хода. Узел состоит из операционного усилителя *A1*, работающего в режиме компаратора, и двух управляемых ограничителей обратной связи по напряжению, содержащих стабилитроны *VD3* и *VD4* и последовательно включенные с ними полевые транзисторы *VT1* и *VT2*.

Стабилитроны и полевые транзисторы подключены параллельно обратной связи по напряжению. Управление транзисторами производится компаратором через времязадающие цепочки *R13—C2* и *R14—C3*. Усилитель-компаратор *A1* является регистратором сварочного тока. На инвертирующий вход усилителя *A1* через резистор *R10* подается положительный сигнал от источника питания и сигнал отрицательной обратной связи по току, неинвертирующий вход через резистор *R11* подключен к общему нулевому выводу. В режиме холостого хода сигнал обратной связи по току отсутствует. На инвертирующий вход подается только положительный потенциал $+U_{\text{п}}$. Отрицательное напряжение на выходе, близкое к $-U_{\text{п}}$, открывает полевые транзисторы *VT1* и *VT2*; следовательно, сигнал обратной связи будет ограничен до уровня напряжения стабилизации стабилитронов *VD3* и *VD4* (около 13 В). Напряжение $U_{\text{у}}$ на выходе усилителя *A2* снижается — напряжение холостого хода возрастает. Стабилитрону с меньшим напряжением стабилизации соответствует большее напряжение холостого хода. В исход-

ном состоянии устанавливается максимальное напряжение холостого хода. В этом случае нарастание тока короткого замыкания в момент возбуждения дуги происходит по пологопадающей внешней характеристике при высоком напряжении холостого хода.

При протекании сварочного тока на инвертирующий вход усилителя *A1* подается отрицательный сигнал обратной связи по току. При сварочном токе 7—10 А этот потенциал становится больше положительного потенциала, подаваемого через резистор *R10*. Компаратор *A1* срабатывает, на его выходе появляется положительный потенциал, транзисторы *VT1* и *VT2* через диоды *VD1* и *VD2* закрываются с малой задержкой во времени. Стабилитроны отключаются, на вход компаратора *A1* через резистор *R15* поступает полнсе напряжение обратной связи, происходит выход на режим работы, обусловленный напряжением задания. При обрыве дуги компаратор вновь возвращается в исходное состояние. С выдержкой времени, заданной цепочками *R13—C2* и *R14—C3*, открываются полевые транзисторы, стабилитроны *VD3* и *VD4* последовательно ограничивают действие обратной связи по напряжению, происходит плавно-ступенчатое возрастание напряжения холостого хода. Для предварительной настройки сварочного напряжения при работе на жестких внешних характеристиках узел ограничения обратной связи по напряжению может быть кратковременно отключен подачей переключателем *S2* положительного потенциала через резистор *R9* на неинвертирующий вход компаратора *A1*. При работе на падающих внешних характеристиках компаратор *A1* отключается подачей положительного потенциала на его вход переключателем *S1.1*.

Тиристорные сварочные выпрямители серии ВДУ и ВДГ. В настоящее время выпускается значительное число тиристорных сварочных выпрямителей для ручной дуговой и механизированной сварки в защитных газах и под флюсом. Электрические схемы выпрямителей предусматривают переключение их для работы как с жесткими, так и с падающими внешними характеристиками. Все выпрямители обеспечивают плавное дистанционное регулирование сварочного тока и напряжения, а также стабилизацию режима при изменении напряжения питающей сети. При работе на падающих внешних характеристиках выпрямители обеспечивают стабилизацию тока

Таблица 9.9

Параметры	ВДУ-305	ВДУ-504-1	ВДУ-1201	ВДГ-601
Номинальный сварочный ток, А	315	500	1250	630
Режим работы, ПВ, %	60		100	60
Напряжение холостого хода, В, не более	70	80	85	90
Номинальное рабочее напряжение, В, при работе на характеристиках:				
жестких	38	50	56	66
падающих	32,6	46		—
Пределы регулирования сварочного тока, А, при работе на характеристиках:				
жестких	50—315	100—500	300—1250	100—700
падающих	20—315	60—500		—
Пределы регулирования рабочего напряжения, В, при работе на характеристиках:				
жестких	16—38	18—50	24—56	18—66
падающих	21—33	23—46	26—56	—
Первичная мощность, кВ·А, не более	23	40	118	69
КПД, %, не менее	70	82	83,5	82
Габаритные размеры, мм	975×634×760	1085×808×1026	1350×850×1250	900×1140×920
Масса, кг, не более	230	370	730	550

при изменении напряжения сети до 5 % с точностью не хуже ±2,5 %, при изменении напряжения сети до —10 % — не хуже ±5 %. При работе на жестких характеристиках при аналогичных колебаниях напряжения сети обеспечивается стабилизация рабочего напряжения с точностью ±1 В.

Выпрямители изготовляются в однокорпусном исполнении, имеют принудительную вентиляцию. Включение выпрямителей в сеть, защита от внутренних и внешних

Таблица 9.10

Параметры	ВДУ-505	ВДУ-506	ВДУ-601
Номинальный сварочный ток, А	500		630
Режим работы, ПВ, %	60		
Напряжение холостого хода, В, не более	80		90
Номинальное рабочее напряжение, В, при работе на характеристиках:			
жестких	50		56
падающих	46		52
Пределы регулирования сварочного тока, А, при работе на характеристиках:			
жестких	60—500		65—630
падающих	50—500		50—630
Пределы регулирования рабочего напряжения, В, при работе на характеристиках:			
жестких	18—50		18—56
падающих	22—46		22—52
Первичная мощность, кВ·А, не более	10		60
КПД, %, не менее	82	79	75
Габаритные размеры, мм	790× ×670× ×880	820× ×620× ×1100	860× ×690× ×1100
Масса, кг, не более	300		320

коротких замыканий производятся сетевым автоматическим выключателем, защита от перегрузок — тепловыми реле магнитных пускателей. Технические характеристики тиристорных сварочных выпрямителей ВДУ-305, ВДУ-504-1, ВДУ-1201 и ВДГ-601, схемы управления которых выполнены с применением логических элементов серии «Логика» Т, приведены в табл. 9.9.

В табл. 9.10 представлены технические данные тиристорных выпрямителей с универсальными характеристиками типа ВДУ-505, ВДУ-506 и ВДУ-601, разработанных с применением интегральных микросхем и имеющих ряд дополнительных преимуществ.

Выпрямители ВДУ-305, ВДУ-504-1, ВДУ-506, ВДУ-601 выполняются на колесах, ВДУ-505, ВДГ-601, ВДУ-1201— стационарные. Выпрямители ВДУ-504-1, ВДУ-506, ВДУ-601, ВДУ-1201, ВДГ-601 имеют нишу для размещения блока управления сварочным полуавтоматом или

автоматом и трансформатор для питания цепей их управления и подогревателя газа.

Сварочный выпрямитель ВДУ-305. Этот выпрямитель предназначен для ручной дуговой сварки штучными электродами на падающих характеристиках и полуавтоматической сварки в среде углекислого газа на жестких характеристиках. Он выполнен по двойной трехфазной схеме с уравнительным реактором с применением тиристоров Т160. Широкие пределы регулирования по току и напряжению в одном диапазоне обеспечиваются за счет использования блока подпитки (см. рис. 9.26, *б*), состоящего из трехфазного дросселя с двумя обмотками на каждой фазе и вентилей. Внешняя характеристика подпитки — крутопадающая, ток короткого замыкания равен примерно 15 А. Параметры дросселя в сварочной цепи и его включение такие же, как и у выпрямителя ВДУ-504-1. Система импульсно-фазового управления тиристорами также выполнена по вертикальному принципу и включает в себя три блока фазового управления (БФУ), цепи задания сварочного тока и напряжения, цепи обратной связи по току и напряжению, переключатель вида характеристик. Работа противофазных тиристоров обеспечивается от одного БФУ. Схема БФУ аналогична БФУ тиристорных сварочных трансформаторов для автоматической сварки под флюсом и рассмотрена в главе восьмой. Импульсы управления тиристорами являются частью полуволны синусоид.

При работе на падающих внешних характеристиках применена обратная связь по току с датчиком в виде магнитного усилителя. Обратная связь по напряжению при работе на жестких внешних характеристиках обеспечивает только стабилизацию выходных параметров при колебаниях напряжения сети. В этом случае сварка ведется практически не естественных внешних характеристиках источника. Жестким внешним характеристикам соответствует высокое напряжение холостого хода. Как известно, для стабильного зажигания дуги скорость нарастания тока в момент короткого замыкания электродной проволоки и изделия должна быть значительно больше, чем при периодических замыканиях в установившемся сварочном процессе. Улучшению зажигания способствует повышенное напряжение холостого хода.

Внешние характеристики выпрямителя ВДУ-305 приведены на рис. 9.37.

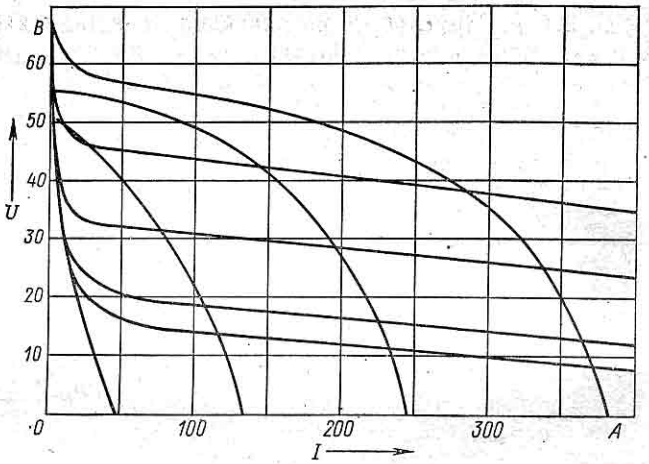


Рис. 9.37. Внешние характеристики универсального сварочного выпрямителя ВДУ-305

Сварочный выпрямитель ВДУ-504-1. Этот выпрямитель предназначен для ручной дуговой сварки, механизированной сварки под флюсом и в среде защитных газов. Упрощенная принципиальная схема выпрямителя приведена на рис. 9.28. Выпрямитель собран по двойной трехфазной схеме выпрямления с уравнительным реактором с использованием тиристоров Т160. При работе на падающих внешних характеристиках предусмотрен один, а на жестких — два диапазона регулирования тока и напряжения. Граница между диапазонами регулирования при работе на жестких внешних характеристиках — примерно при токе 250 А и рабочем напряжении 27 В. При работе на падающих внешних характеристиках и на большом диапазоне жестких первичные обмотки трансформатора *Т1* включены треугольником, на малом диапазоне жестких характеристик — звездой. Переключение производится переключателем *S1*.

Дроссель в сварочной цепи имеет два вывода: первый соответствует большой индуктивности и его используют при работе на падающих внешних характеристиках, а также при сварке толстыми и тонкими электродными проволоками на токах свыше 200 А; второй соответствует малой индуктивности и используется при работе на втором диапазоне жестких характеристик при сварке на

токах до 200 А. При работе на падающих внешних характеристиках применяется обратная связь по току (переключатель вида характеристик в положении *II*), а на жестких — обратная связь по напряжению и току (положение переключателя *I*). Внешние характеристики выпрямителя приведены на рис. 9.38.

Сварочный выпрямитель ВДУ-1201. Выпрямитель предназначен для сварки в среде защитных газов и под флюсом, сварки порошковой проволокой на автоматах с зависимой и не зависимой от напряжения дуги скоростью подачи электродной проволоки. Сварочный выпрямитель собран по шестифазной кольцевой схеме выпрямления с использованием тиристоров Т-500. Система фазового управления тиристорами построена аналогично схеме выпрямителя ВДУ-504-1, однако устройство формирования управляющих импульсов (см. рис. 9.32) имеет в данном случае дополнительно три разделительных импульсных трансформатора, а ограничение амплитуды и ширины импульса управления производится с помощью конденсаторов. При работе на падающих внешних характеристиках действует обратная связь по току, причем в качестве

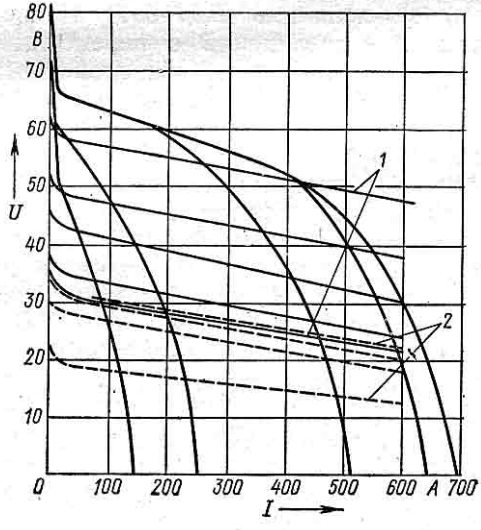


Рис. 9.38. Внешние характеристики универсального сварочного выпрямителя ВДУ-504-1

1 — диапазон больших токов; *2* — диапазон малых токов

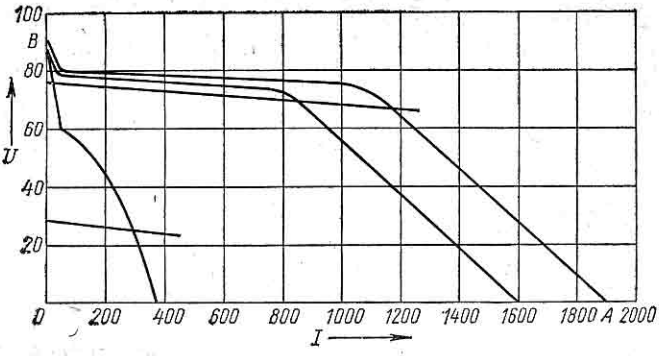


Рис. 9.39. Внешние характеристики сварочного выпрямителя ВДУ-1201

датчика тока применен операционный усилитель (см. рис. 9.29). При работе на жестких внешних характеристиках действует обратная связь по напряжению и току. Для сглаживания выпрямленного напряжения и улучшения сварочных качеств выпрямитель снабжен дросселем в сварочной цепи. На рис. 9.39 приведены внешние характеристики выпрямителя.

Сварочный выпрямитель ВДГ-601. Процесс сварки в углекислом газе соединений с переменным зазором, металлоконструкций со швами, расположенными в нижнем и вертикальном положениях, конструкций из металла различных толщин может в ряде случаев производиться в двух дистанционно переключаемых режимах без изменения диаметра электродной проволоки. Для указанных целей выпускается двухрежимный сварочный выпрямитель ВДГ-601, работающий в комплекте с двухрежимным полуавтоматом. Выпрямитель предназначен для сварки в среде углекислого газа и имеет только жесткие внешние характеристики (рис. 9.40).

Выпрямитель ВДГ-601 позволяет производить (местно или дистанционно) независимую настройку рабочего напряжения для двух режимов сварки с помощью двух отдельных потенциометров. Дистанционное переключение режимов осуществляется промежуточным реле, включаемым с пульта управления полуавтомата. Одновременно производится и переключение скорости подачи электродной проволоки. Выпрямленное напряжение при переходе с режима на режим изменяется плавно за счет временной задержки. Дроссель в сварочной цепи выпрямителя имеет

две ступени индуктивности (200 и 500 мкГн). Индуктивность для каждого режима может быть установлена предварительно и дистанционно переключаться в процессе сварки вместе с изменением режима. Конструкция дросселя приведена на рис. 9.25.

Источник имеет широкие пределы регулирования тока и напряжения в одном диапазоне. Для расширения пределов регулирования в одном диапазоне выпрямитель снабжен блоком подпитки, выполненным в соответствии со схемой на рис. 9.26, *а* и имеющим внешнюю характеристику, приведенную на рис. 9.27. Выпрямительный блок ВДГ-601 собран по шестифазной кольцевой схеме выпрямления с использованием тиристоров Т-320. Система фазового управления имеет три канала управления на базе элемента Т-404 и близка к схеме выпрямителя ВДУ-1201. Для получения жестких внешних характеристик в выпрямителе используется только обратная связь по выходному напряжению.

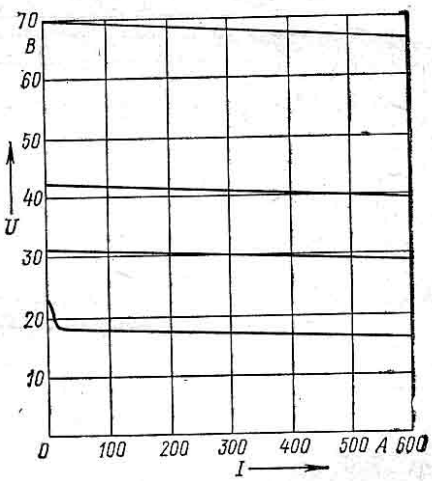


Рис. 9.40. Внешние характеристики сварочного выпрямителя ВДГ-601

Сварочные выпрямители ВДУ-505, ВДУ 506, ВДУ-601. Это универсальные тиристорные выпрямители с жесткими и падающими внешними характеристиками. Они предназначены для сварки в среде защитных газов и под флюсом, могут применяться для ручной дуговой сварки штучными электродами. Выпрямители обеспечивают плавное регулирование рабочего напряжения и тока в одном диапазоне, могут быть использованы для совместной работы с роботами и автоматическими манипуляторами.

При работе с манипуляторами предъявляются повышенные требования к таким технологическим показателям источника, как надежность начального зажигания дуги, устойчивость процесса сварки во всех пространственных положениях.

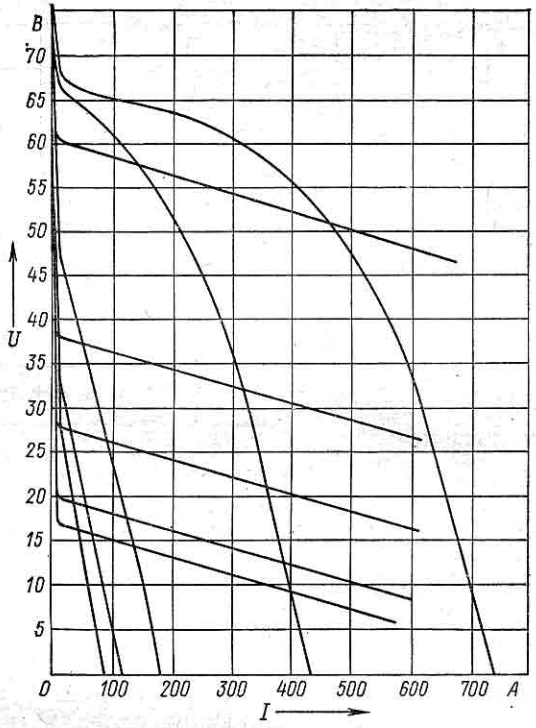


Рис. 9.41. Внешние характеристики сварочных выпрямителей ВДУ-505 и ВДУ-506

В схему выпрямителей введен специальный узел, обеспечивающий избирательное по величине форсирование зажигания дуги в зависимости от протяженности и положения шва в пространстве. Выпрямители позволяют осуществлять сварку материалов малых толщин на токах начиная с 60 А с применением сварочных проволок диаметром 1,0 и 1,2 мм, а также бесступенчатое автоматическое изменение индуктивности в сварочной цепи в зависимости от режима сварки.

Структурная схема выпрямителей и упрощенные схемы управления приведены на рис. 9.33, 9.34 и 9.36. Повышение стабильности сварки и бесступенчатое регулирование индуктивности в сварочной цепи производятся дросселем, показанным на рис. 9.36. Дроссель L с воздушным зазором имеет основную рабочую обмотку I, включенную

последовательно в сварочную цепь, и две вспомогательные обмотки управления *II* и *III*, подключенные через тиристоры *VS1* и *VS2* к плюсовому зажиму выпрямителя. Общая точка вспомогательных обмоток присоединена к минусовому зажиму. При работе на падающих внешних характеристиках обмотки *II* и *III* отключены, индуктивность дросселя при этом равна 500 мкГн. Работа дросселя при сварке на жестких внешних характеристиках описана при рассмотрении сварочного выпрямителя ВДГ-303.

Выпрямители собраны по двойной трехфазной схеме выпрямления с уравнительным реактором. В выпрямителях ВДУ-505 и ВДУ-506 применены тиристоры Т160, а в ВДУ-601 — тиристоры ТЛ250. Внешние характеристики выпрямителей ВДУ-505 и ВДУ-506 приведены на рис. 9.41. Характеристики ВДУ-601 имеют аналогичный характер.

Выпрямитель ВДУ-601 является двухрежимным источником питания и позволяет независимо осуществлять настройку рабочего напряжения для двух режимов сварки с помощью отдельных потенциометров. Дистанционное переключение режимов производится с пульта управления полуавтомата.

9.5. МНОГОПОСТОВЫЕ СВАРОЧНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Эти выпрямители применяются главным образом в судостроении и крупном машиностроении, когда на небольшой производственной площадке сосредоточено значительное число сварочных постов. При расчете числа постов, питаемых от источника, вводится коэффициент одновременности работы постов k. Обычно для ручной и механизированной сварки под флюсом принимается $k = 0{,}5 \ldots 0{,}7$, а для сварки в среде защитного газа $k = 0{,}7 \ldots 0{,}9$.

Число постов n, которое может быть подключено к многопостовому выпрямителю, можно определить из соотношения

$$n = I_{\text{ном}}/(kI_{\text{ном. п}}),$$

где $I_{\text{ном}}$ — номинальный ток выпрямителя; $I_{\text{ном. п}}$ — номинальный ток поста.

Одним из основных требований, предъявляемых к многопостовым системам, является независимость работы постов друг от друга.

Многопостовые выпрямители для ручной дуговой сварки. Они предназначены в основном для создания многопостовых систем питания от общих цеховых магистральных шинопроводов. Для обеспечения независимой работы отдельных постов выпрямители имеют жесткую внешнюю вольт-амперную характеристику. Напряжение на выходе многопостового выпрямителя при изменении нагрузки от 50 до 100 % номинальной изменяется не более чем на 4 В. Выпрямители ВДМ отличаются простотой конструкции и состоят из трехфазного трансформатора, выпрямительного блока, вентилятора, пусковой и защитной аппаратуры. Схема выпрямления — шестифазная кольцевая, применены неуправляемые вентили на 320 и 400 А.

Выпрямительный блок ВДМ-1001 состоит из шести вентилей Д161-400, блок ВДМ-1601 — из 12 вентилей Д161-320 (по два вентиля в плече параллельно).

Каждый пост подключается к источнику питания (магистрали) последовательно через балластный реостат, обеспечивающий получение падающих внешних характеристик и регулирование сварочного тока. Ток сварочного поста $I_п = I_д$ ($I_д$ — ток дуги) при заданном напряжении дуги $U_д$ равен

$$I_п = (U_{ном} - U_д)/R_б,$$

где $U_{ном}$ — номинальное напряжение источника питания; $R_б$ — включенное балластное сопротивление реостата.

Подобные многопостовые системы имеют ряд преимуществ: меньшую по сравнению с однопостовыми выпрямителями стоимость ухода, ремонта и обслуживания; возможность в случае необходимости вести сварку большими токами; меньшую, чем у эквивалентного числа однопостовых выпрямителей, рабочую площадь и т. д. Однако одним из существенных недостатков такой многопостовой системы являются большие потери мощности в балластном реостате, снижающие КПД поста. КПД поста $\eta_п$ определяется как

$$\eta_п = P_д/P_п = U_д/U_{ном},$$

где $P_д$ — мощность, используемая в дуге; $P_п$ — мощность, подводимая к посту.

Общий КПД многопостовой системы $\eta_{м.с}$ с учетом КПД выпрямителя η будет

$$\eta_{м.с} = \eta\eta_п.$$

Таблица 9.11

Параметры	ВДМ-1001	ВДМ-1601
Номинальный сварочный ток, А, при ПН = 100 %	1000	1600
Номинальное рабочее напряжение, В	60	
Напряжение холостого хода, В	70	
Первичная мощность, кВ·А	74	120
КПД, %	90	
Масса, кг, не более	420	770
Габаритные размеры, мм	1100×700××900	1050×850××1650
Число постов	7	9
Номинальный ток поста при ПН = 60 %, А	315	

Принимая $U_д = 28$ В; $U_{ном} = 60$ В и $\eta = 0{,}9$, получим $\eta_{м.с} = 0{,}42$. Этот КПД будет еще меньше, если учесть потери в магистральных шинопроводах. Однако, несмотря на низкий КПД, такая система имеет широкое распространение в промышленности.

В табл. 9.11 приведены технические характеристики выпрямителей типа ВДМ.

Технические данные балластного реостата РБ-302 приведены ниже:

Номинальный сварочный ток, А, при ПН = 60 % . .	315
Наименьшее сопротивление, Ом, не более	0,095
Наибольшее сопротивление, Ом, не менее	5
Пределы регулирования тока при падении напряжения на зажимах реостата 30 В, А	6—315
Разница между током соседних ступеней, А, не более	6
Масса, кг, не более	29,5
Габаритные размеры, мм	610×370×500

Многопостовой выпрямитель для механизированной сварки в углекислом газе. Многопостовой сварочный выпрямитель ВМГ-5000 в основном предназначен для централизованной системы питания сварочных постов при сварке в среде углекислого газа. Выпрямитель имеет жесткую внешнюю характеристику и собран по двойной трехфазной схеме выпрямления с уравнительным реактором и использованием неуправляемых вентилей В200. Первичная обмотка трансформатора соединена в звезду и секционирована, что позволяет получить пять значений

выходного напряжения вторичных обмоток. Охлаждение выпрямителя водяное. Регулирование напряжения на постах, питаемых от выпрямителя ВМГ-5000, производится автономно при помощи балластных реостатов типа РБГ-302. В большинстве случаев наклон внешней статической характеристики должен находиться в пределах 0,07—0,12 В/А. При сварке в вертикальном положении на токах до 200 А сварочные посты дополнительно оборудуются дросселями с индуктивностью 300 мкГн, включаемыми последовательно с балластным реостатами.

При наличии на цеховом шинопроводе одного неизменного напряжения применение балластных реостатов ограничивает диапазон регулирования и сварочные посты вынуждены работать в близких по току режимах. Для расширения диапазона регулирования система питания должна иметь в цехе распределительные шинопроводы низкого и повышенного напряжений. На каждый шинопровод в этом случае будут работать выпрямители со своим выходным напряжением. Рассмотренная система питания также имеет повышенный расход электроэнергии и невысокий КПД сварочного поста. Технические данные выпрямителя ВМГ-5000 приведены ниже:

Номинальный выпрямленный ток, А, при ПН = = 100 %	5000
Выпрямленное напряжение, В, по ступеням	30, 35, 40, 50, 60
Первичная мощность, кВ·А	317
КПД, %	92
Габаритные размеры, мм	1500×1150×1685
Масса, кг	2490
Число постов	30
Номинальный ток поста при ПН = 60 %, А	315

Многопостовой тиристорный сварочный выпрямитель с универсальными характеристиками. Наряду с многопостовыми системами питания, имеющими общий шинопровод и постовые балластные реостаты, представляют интерес многопостовые сварочные выпрямители с тиристорным регулированием тока и напряжения на каждом посту. В этом случае выпрямительные установки могут размещаться на различных сварочных участках, образуя при необходимости местные системы многопостового питания. При сохранении всех преимуществ однопостовых выпрямителей снижаются масса и габариты установок, повышается КПД поста, улучшаются эксплуатационные возможности. Многопостовые источники питания с тири-

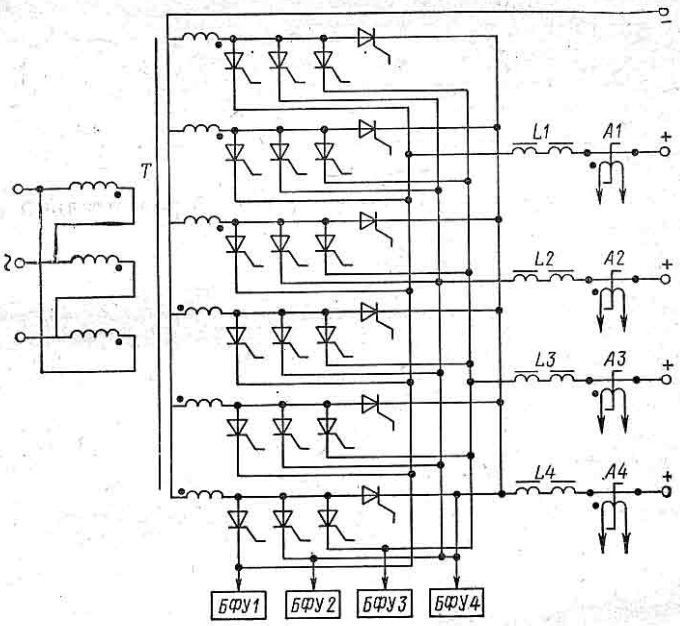


Рис. 9.42. Упрощенная электрическая схема силовой части многопостового сварочного выпрямителя ВДУМ-4×401

сторным регулированием имеют единый трансформатор питания и независимые тиристорные выпрямительные блоки с самостоятельными устройствами фазового управления.

Система с параллельно работающими тиристорными блоками налагает дополнительные требования к схеме выпрямления сварочного поста. В этом случае работающий тиристор одного выпрямительного блока не должен шунтировать тиристор другого. В связи с этим становится невозможным использование широко распространенной трехфазной мостовой схемы выпрямления с шестью управляемыми вентилями. Нецелесообразно применение и шестифазной кольцевой схемы, так как число вторичных обмоток трансформатора должно быть равно числу сварочных постов. Выпрямители могут быть выполнены по трем известным схемам: двойной трехфазной схеме с самостоятельными уравнительными реакторами в катодных цепях тиристоров каждого сварочного поста, трехфазной несимметричной мостовой схеме с тремя управляемыми

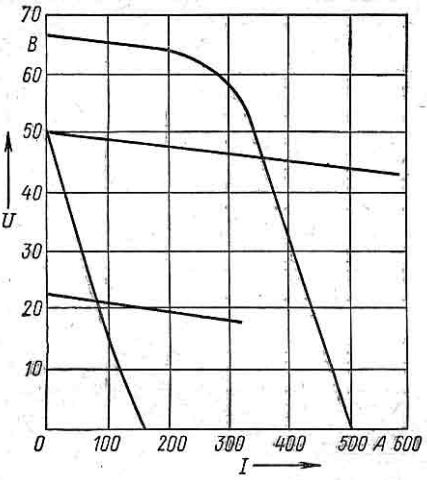


Рис. 9.43. Внешние характеристики сварочного выпрямителя ВДУМ-4×401

вентилями катодной группы и простой шестифазной схеме выпрямления.

Конкретный выбор схемы обусловлен параметрами выпрямителя, видом внешних характеристик, типом используемых тиристоров и т. д. Следует помнить, что применение несимметричной мостовой схемы приводит к значительному увеличению пульсации сварочного тока, худшему использованию тиристоров по току, увеличению габаритов сглаживающих дросселей. На рис. 9.42 приведена упрощенная электрическая схема силовой части многопостового выпрямителя ВДУМ-4×401. Как видно из рисунка, выпрямитель состоит из общего силового трансформатора *Т*, четырех независимых силовых тиристорных выпрямителей, блоков фазового управления (БФУ) с датчиками тока на магнитных усилителях *А* и дросселей *L* в цепи выпрямленного тока, которые и образуют собственно четыре поста выпрямителя. В отличие от однопостовых выпрямителей дроссель *L* выполняет в данном случае функции не только сглаживания и ограничения пиков тока в процессе сварки, но и является разделительным дросселем, обеспечивающим независимость работы постов и тиристорных выпрямительных блоков. Многопостовой выпрямитель разработан по простой шестифазной схеме выпрямления с нулевой точкой. В выпрямительных блоках применены тиристоры Т160. Система фазового управления тиристорами каждого поста практически аналогична системе управления у выпрямителя ВДУ-504-1.

Выпрямитель имеет падающие и жесткие внешние характеристики. Падающие характеристики получаются за счет введения обратной связи по току, жесткие — при совместном действии обратной связи по напряжению и току. Таким образом, один и тот же источник питания

может быть использован одновременно для сварки в среде углекислого газа и ручной дуговой сварки штучными электродами. Выпрямитель обеспечивает стабилизацию параметров при колебаниях напряжения сети, дистанционное регулирование тока, напряжения и включение сварочного режима. Выпрямитель — стационарный, с принудительной воздушной вентиляцией. Параметры выпрямителя приведены ниже:

Номинальный сварочный ток поста, А, при ПН = = 60 %	400
Число сварочных постов	4
Номинальное рабочее напряжение, В, при работе на характеристиках:	
жестких	45
падающих	36
Пределы регулирования сварочного тока, А	100—400
Пределы регулирования рабочего напряжения, В, при работе на характеристиках:	
жестких	18—45
падающих	24—36
Напряжение холостого хода, В, не более	75
Первичная мощность, кВ·А	100
КПД, %, не менее	75
Габаритные размеры, мм	1350×850×1200
Масса, кг, не более	790

На рис. 9.43 приведены внешние характеристики выпрямителя.

9.6. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Техническое обслуживание выпрямителей должно производиться после тщательного изучения паспорта, входящего в комплект их поставки. Паспорт содержит подробные сведения об устройстве выпрямителя, порядке работы, указания мер безопасности, измерения параметров и т. д.

Подготовка изделия к работе. Перед пуском нового выпрямителя или перед пуском выпрямителя, длительное время не бывшего в эксплуатации, необходимо:

очистить выпрямитель от пыли;

проверить мегомметром на 1000 В сопротивление изоляции выпрямителя между первичной и вторичной цепями, а также между этими цепями и корпусом. Сопротивление изоляции должно быть не ниже 0,5 МОм;

заземлить корпус выпрямителя и зажим вторичной цепи выпрямителя, к которому подключается провод, идущий к изделию, и сварочный стол;

Таблица 9.12

Тип выпрямителя	Сечение проводов, мм²	
	первичной цепи	вторичной цепи
ВД-201	4 для 220 В 2,5 для 380 В	25
ВД-306 ВДГ-303 ВС-300А	6	50
ВД-401		75
ВДУ-504-1 ВДУ-505 ВДУ-506 ВД-502-2	10 для 220 В 6 для 380 В	95
ВДГ-601 ВДУ-601	16	95
ВДУ-1201 ВДМ-1001 ВДМ-1601 ВДУМ-4×401	70 50 70 50	250 200 300 75 для каждого поста

проверить состояние приборов, электрических проводов, контактов, паек;

подключить выпрямитель к сети.

Выпрямитель должен подключаться к трехфазной сети через трехполюсный рубильник, трубчатые предохранители или другое вводное устройство.

В табл. 9.12 приведены минимальные сечения медных изолированных присоединительных проводов для ряда выпрямителей различных типов.

Порядок работы, измерение параметров и регулирование. Порядок работы и тем более измерение параметров и регулирование зависят от назначения выпрямителя, принципа регулирования, электрической схемы и т. д. Рассмотрим эти вопросы применительно к наиболее новому сварочному выпрямителю с универсальными внешними характеристиками типа ВДУ-506. Ряд положений окажется общим и для сварочных выпрямителей всех типов:

1. Концы сварочных кабелей подключить к выпрямителю. При сварке током прямой полярности к минусовому зажиму подключается кабель, соединенный с электродом.

2. Установить необходимый вид внешних характеристик. Виды характеристик обозначены у переключателя соответствующими символами.

3. Установить в нужное положение переключатель положения регулирования режима сварки — местное или

дистанционное с пульта управления полуавтомата или автомата.

4. Подать напряжение на выпрямитель через рубильник или другое внешнее коммутирующее устройство.

5. Установить рукоятку автоматического выключателя во включенное положение. При этом должна загореться сигнальная лампа на лицевой панели выпрямителя.

6. Произвести пуск вентилятора нажатием пусковой кнопки. Убедиться в правильном входе охлаждающего воздуха. Воздух должен засасываться со стороны лицевой панели. Если воздух имеет обратное направление, необходимо поменять местами два провода питания на входе выпрямителя.

7. Включить в случае необходимости трансформатор питания цепей управления автомата, полуавтомата и подогревателя газа.

8. При местном регулировании включить выпрямитель выключателем «Включение сварки», предварительно убедившись, что регулятор тока — напряжения (*R1* на рис. 9.36) находится в среднем положении. Пускатель подключит силовой трансформатор выпрямителя к сети, на выходе должно появиться напряжение холостого хода 65—80 В.

9. При работе выпрямителя на жестких внешних характеристиках в случае необходимости произвести предварительную настройку рабочего напряжения в процессе сварки. Переключатель *S2* (рис. 9.36) переводится в положение, обозначенное символом «Жесткие внешние характеристики»; напряжение холостого хода выпрямителя падает, приближаясь к рабочему. Не отпуская переключатель *S2*, резистором — регулятором напряжения установить необходимое рабочее напряжение по вольтметру на блоке управления. Следует учесть, что вследствие наклона жестких характеристик рабочее напряжение примерно на 30 % меньше указанного на приборе. Так, например, для режима сварки 18 В, 100 А на холостом ходу следует установить напряжение $U_{х.х} = 18 + 0{,}3 \times \times 18 = 23$ В; для режима сварки 50 В, 500 А — примерно 65 В и т. д. Необходимая корректировка режима ведется в процессе сварки.

10. При работе выпрямителя на падающих характеристиках режим подбирается путем пробных сварок.

11. После окончания сварки перевести выключатель сварки в положение «Выключено».

12. При перерыве в работе отключить выпрямитель нажатием кнопки «Стоп»; поставить рукоятку автоматического выключателя в положение «Выключено».

Проверка и настройка параметров, характерные неисправности. Проверка и настройка параметров производятся главным образом после ремонта выпрямителя и замены отдельных элементов схемы. Как и в предыдущем разделе, рассмотрение ведется применительно к сварочному выпрямителю ВДУ-506.

1. Проверка фазировки и работы схемы:

1.1. Подключить выпрямитель к сети.

1.2. Поставить переключатель вида внешних характеристик в положение, соответствующее падающим характеристикам, переключатель положения регулирования — в положение «Местное управление».

1.3. Подключить нагрузку к выходным зажимам выпрямителя. В качестве нагрузки могут быть использованы балластные реостаты РБ-301, РБ-302 или другого типа.

1.4. Включить вентилятор кнопкой «Пуск». Воздух должен засасываться в выпрямитель со стороны лицевой панели.

1.5. Нажатием перевести выключатель «Включение сварки» вправо в положение «Включено» и отпустить его.

1.6. На холостом ходу выпрямителя проверить низкочастотным осциллографом наличие шестифазной пульсации выходного напряжения при вращении резистора — регулятора тока.

1.7. Нагрузить выпрямитель на активное сопротивление. При одном из промежуточных режимов, например 32 В, 300 А, проверить плавность изменения тока (напряжения) при изменении положения регулятора. Убедиться, что пульсация выпрямленного напряжения во всем диапазоне регулирования остается за период шестифазной.

1.8. При отсутствии плавного регулирования, а также при периодическом исчезновении одной или нескольких пульсаций необходимо проверить фазировку вспомогательного трансформатора и элементов канала БФИ (рис. 9.34) до тиристоров. При наличии всех управляющих импульсов и отсутствии плавного регулирования следует поменять местами любые два провода питающей сети, подводящие к штыревому разъему выпрямителя, не обращая внимания на неправильное вращение вентилятора. Поджать контакты магнитного пускателя в цепи силового

трансформатора. При достижении плавного регулирования тока и напряжения изменить направление вращения двигателя вентилятора в соответствии с необходимым входом воздуха в выпрямитель. В случае отсутствия импульсов на управляющих электродах отдельных тиристоров необходимо проверить их формирование и последовательность прохождения по всему каналу управления. При проверке следует использовать выводы контрольных точек на разъем печатной платы. Все измерения производятся относительно общей точки *1* на положительном выводе шунта *RS* (рис. 9.36).

1.9. Проверить действие обратной связи по току. Следует помнить, что при обрыве цепи отрицательной обратной связи по току напряжение на выходе выпрямителя равно нулю независимо от положения регулятора *R1*. Для проверки действия обратной связи следует вывести потенциометр *R21* (рис. 9.36), определяющий коэффициент передачи операционного усилителя *A2*, в среднее положение. Установить режим примерно 24 В, 100 А. Увеличивая балластным реостатом ток нагрузки, убедиться в том, что внешняя характеристика имеет крутой наклон (ток короткого замыкания 150—200 А). При отсутствии такого наклона необходимо проверить цепь обратной связи по току и особенно полярность подключения блока к шунту.

1.10. Поставить переключатель вида характеристик в положение, соответствующее жестким внешним характеристикам.

1.11. Проверить работу выпрямителя аналогично пп. 1.5.; 1,6; 1.7. Напряжение холостого хода выпрямителя при работе на жестких внешних характеристиках должно быть близко к напряжению холостого хода при работе на падающих характеристиках.

1.12. Проверить работу устройства предварительной установки рабочего напряжения. Для этого перевести тумблер в положение, соответствующее жестким внешним характеристикам с ограниченным напряжением холостого хода. Напряжение холостого хода выпрямителя при этом должно уменьшиться.

2. Проверка настройки компаратора.

Настройка компаратора требуется только после замены операционного усилителя *A1* (рис. 9.36) и подключенных к нему элементов. Настройка ведется на жестких внешних характеристиках в режиме холостого хода, при этом усилитель *A1* необходимо перевести в режим уси-

Таблица 9.13

Неисправность	Вероятная причина	Метод устранения	Примечание
1. Выпрямитель автоматически отключается от сети	1. Пробит один или несколько тиристоров выпрямительного блока	1. Отключить выпрямитель от сети. Отключить тиристоры от трансформатора. Проверить все тиристоры	Проверяется омметром
	2. При работе на жестких внешних характеристиках произошло короткое замыкание на выводах выпрямителя	2. Осмотреть внутренние соединения и шинопроводы. Ликвидировать короткое замыкание. Проверить тиристоры	
	3. Вторичную обмотку трансформатора пробило на корпус	3. Проверить сопротивление изоляции выпрямителя. Ликвидировать пробой	
2. На выходе выпрямителя нет напряжения	1. Не работает вентилятор, или воздух засасывается не со стороны лицевой панели	1. Проверить работу вентилятора и пусковой аппаратуры. При необходимости изменить направление вращения двигателя	
	2. Неисправно ветровое реле	2. Проверить работу ветрового реле	
	3. Вышли из строя тиристоры	3. Проверить тиристоры	Проверяются омметром
	4. Обрыв цепи обратной связи по току	4. Проверить цепь обратной связи по току	
	5. Неисправна печатная плата, формирующая напряжение управления; отсутствие $U_у$	5. Проверить работу элементов платы	Проверяется вольтметром постоянного тока

Продолжение табл. 9.13

Неисправность	Вероятная причина	Метод устранения	Примечание
3. При работе выпрямителя не обеспечиваются падающие внешние характеристики	Неправильное подключение цепи отрицательной обратной связи по току	Проверить цепь обратной связи и полярность ее подключения	Проверяется омметром и вольтметром постоянного тока
4. При работе выпрямителя не обеспечиваются жесткие внешние характеристики	Обрыв цепи обратной связи по напряжению	Проверить цепь обратной связи по напряжению	
5. Неустойчивая сварка на падающих и жестких характеристиках	Не на все тиристоры подаются импульсы управления	Проверить наличие импульсов управления на управляющих электродах тиристоров	Проверяется осциллографом
6. Неустойчивая сварка на жестких внешних характеристиках	Разорвана цепь вспомогательной обмотки дросселя в сварочной цепи	Проверить цепи вспомогательных обмоток дросселя и исправность тиристоров *VS1* и *VS2*. Проверить напряжение на управляющих электродах тиристоров	Проверяется омметром и вольтметром постоянного тока. Напряжение на обмотках дросселя проверяется вольтметром переменного тока

лителя. Для этого перемычка на инвертирующем входе перепаивается в положение *2—3*. Вольтметром постоянного тока замеряется напряжение на выходе усилителя *A1*. Перемещением движка резистора *R25* следует добиться отсутствия напряжения на выходе. После настройки необходимо перепаять перемычку в положение *2—4*. Срабатывание компаратора (изменение напряжения на выходе усилителя *A1* с —10 на +20 В) должно происходить при токе нагрузки 7—10 А.

Напряжение на выходе компаратора должно изменять свой знак и при включении на холостом ходу тумблера предварительной настройки режима (*S2* на рис. 9.36).

3. Проверка работы сглаживающего дросселя.

Проверка работы сглаживающего дросселя производится на жестких характеристиках.

Установить режим 18 В, 100 А. При этом ЭДС на выводах вспомогательных обмоток *II* и *III* (рис. 9.36) должна быть 18 В.

4. Настройка сварочного выпрямителя.

4.1. Установить переключатель вида характеристик в положение, соответствующее падающим внешним характеристикам. После 5 мин работы выпрямителя в режиме холостого хода подключить нагрузку. Установить резистор — регулятор тока (*R1*) на деление 9. Подстроечным резистором *R8* (рис. 9.36) и нагрузкой установить номинальный режим 46 В, 500 А. При указанном режиме ток короткого замыкания выпрямителя должен быть (725 + 25) А. Подстройка тока короткого замыкания производится резистором *R21*.

4.2. Перевести переключатель в положение, соответствующее жестким характеристикам. Резистором *R17* и нагрузкой установить режим 50 В, 500 А.

Некоторые характерные неисправности выпрямителя ВДУ-506 и методы их устранения приведены в табл. 9.13.

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ

СВАРОЧНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ, ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И АГРЕГАТЫ

10.1. КЛАССИФИКАЦИЯ МАШИННЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ И ОБЛАСТЬ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

Все машинные источники питания, содержащие сварочные генераторы, можно распределить по типу привода на следующие группы:

сварочные агрегаты (с приводом от собственного двигателя внутреннего сгорания);

сварочные преобразователи (с приводом от электрического двигателя);

сварочные генераторы, предназначенные для соединения с приводом основных транспортных средств, используемых у потребителя.

Из всех перечисленных групп основной объем выпуска составляют сварочные агрегаты.

По принципу работы сварочные генераторы можно разделить на следующие основные группы:

коллекторные сварочные генераторы постоянного тока;

вентильные сварочные генераторы постоянного тока;

генераторы переменного тока повышенной частоты.

По назначению, т. е. в зависимости от способа сварки (формы внешних статических характеристик), сварочные генераторы и изделия с ними могут распределяться:

на генераторы для ручной дуговой сварки (с крутопадающими характеристиками);

на генераторы для автоматизированной сварки (с жесткими внешними статическими характеристиками);

на универсальные генераторы, имеющие семейства крутопадающих и жестких статических характеристик.

По области применения сварочные агрегаты, преобразователи и генераторы можно разделить на две группы:

изделия общего назначения для применения в различных отраслях народного хозяйства;

специализированные сварочные агрегаты, преобразователи и генераторы, выпускаемые в небольших количествах и предназначенные для целевой поставки в опре-

деленные отрасли (для подводной сварки, для сварки магистральных трубопроводов, для подвижных ремонтных средств и др.).

10.2. ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ И ФОРМИРОВАНИЯ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОЛЛЕКТОРНЫХ СВАРОЧНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Сварочные генераторы в основном применяются при ручной дуговой сварке штучными электродами. Как известно, по условиям статической устойчивости дуги в этом случае генератор должен иметь крутопадающие внешние статические характеристики, т. е. напряжение на зажимах генератора должно резко уменьшаться при увеличении сварочного тока.

Это требование объясняется тем, что ручная дуговая сварка наряду с относительно быстрыми изменениями длины дуги, связанными с процессом переноса металла при сварке, обычно сопровождается относительно медленными изменениями длины дуги, связанными с движениями руки сварщика и изменением конфигурации детали. При этих медленных колебаниях длины дуги точка устойчивого горения дуги лежит на внешней статической характеристике генератора. Если эта характеристика крутопадающая, то при изменениях длины дуги изменения тока сварки будут относительно небольшими. С другой стороны, известно, что стабильность горения дуги тем выше, чем меньше отклонения тока от заданного значения при изменениях длины дуги. Поэтому для ручной дуговой сварки применяются генераторы с крутопадающими внешними статическими характеристиками. Следует, однако, отметить, что и здесь возможны случаи, когда слишком большая крутизна внешней статической характеристики может препятствовать нормальному проведению сварочного процесса. Так, например, при сварке ответственных соединений в вертикальном и потолочном положениях с целью уменьшения тепловложений в шов сварщик иногда периодически удлиняет дугу для соответствующего уменьшения сварочного тока. При этом необходимо, чтобы внешняя характеристика была более пологой, так как только в этом случае изменение длины дуги приведет к ощутимому изменению сварочного тока и сварщик сможет периодически уменьшать его. Однако во всех слу-

чаях ручной дуговой сварки установившийся ток короткого замыкания $I_{к.у}$ не должен чрезмерно превышать рабочий ток $I_р$, обычно $I_{к.у} = (1{,}25 \ldots 1{,}5) I_р$. При бо́льших значениях тока короткого замыкания возможны прожоги, осыпание обмазки и др.

Несколько другие требования предъявляются к внешним статическим характеристикам сварочных генераторов, предназначенных для автоматизированной сварки на аппаратах, оснащенных автоматическими регуляторами режима сварки (автоматы, полуавтоматы). Саморегулирование дуги при этом способе сварки проявляется наиболее эффективно в том случае, когда сварочный генератор имеет более пологие или даже возрастающие (жесткие) внешние статические характеристики.

Таким образом, для автоматизированных способов сварки с саморегулированием дуги требуется, чтобы сварочный генератор имел семейство жестких внешних статических характеристик.

Из перечисленных видов внешних статических характеристик сварочных генераторов наибольшую трудность представляет получение семейства регулируемых крутопадающих внешних статических характеристик. В отечественной и зарубежной практике применялось несколько схем коллекторных генераторов для этих целей:

сварочные генераторы поперечного поля;

сварочные генераторы с расщепленными полюсами;

сварочные генераторы с последовательной обмоткой возбуждения.

В СССР выпускались генераторы всех указанных типов, однако в последние годы в связи с простотой конструкции и энергетическими преимуществами коллекторные сварочные генераторы выпускаются в СССР только по схеме с последовательной обмоткой возбуждения. Эти генераторы составляют основную долю парка эксплуатируемых машин. Поэтому в этом разделе рассматриваются только генераторы с последовательной обмоткой возбуждения.

Принципиальная схема генератора с последовательной обмоткой возбуждения показана на рис. 10.1.

При холостом ходе генератора (сварочная цепь разомкнута) на его зажимах создается напряжение холостого хода, равное по значению ЭДС, создаваемой в обмотке якоря *ОЯ*. Это напряжение при прочих равных условиях зависит от магнитного потока, который создается обмот-

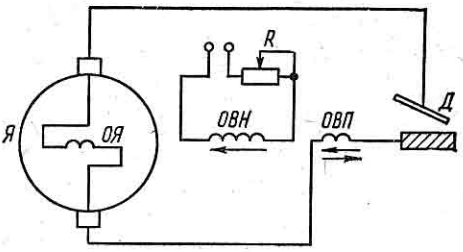


Рис. 10.1. Принципиальная схема коллекторного генератора для дуговой сварки

кой возбуждения *ОВН* и, в свою очередь, определяется током возбуждения в этой обмотке, изменяемым с помощью регулировочного реостата *R*.

После зажигания дуги *Д* в цепи якоря *Я* генератора протекает сварочный ток, проходящий и через витки последовательной обмотки возбуждения *ОВП*, которая включена при работе на крутопадающих характеристиках таким образом, что создаваемый ею магнитный поток направлен против магнитного потока, создаваемого намагничивающей обмоткой *ОВН*. В результате этого с ростом сварочного тока суммарный поток в воздушном зазоре генератора уменьшается, уменьшается и ЭДС, наводимая в обмотке якоря, и напряжение на зажимах генератора. Получается крутопадающая внешняя статическая характеристика. Следует отметить, что в большинстве сварочных генераторов, особенно предназначенных для установки в сварочные агрегаты, обмотка независимого возбуждения питается не от постороннего источника, а от «третьей», добавочной, щетки, установленной между главными щетками, т. е. генераторы выполняются с самовозбуждением.

Примерный вид внешних крутопадающих статических характеристик генератора показан на рис. 10.2. Характерными величинами для семейства внешних характеристик являются пределы регулирования сварочного тока $I_{\min р} \dots I_{\max р}$ и соответствующие им пределы напряжения холостого хода $U_{г0\ \min} \dots U_{г0\ \max}$, а также соответствующие установившийся ток короткого замыкания и крутизна (наклон) внешних статических характеристик в рабочей зоне. Максимальное значение напряжения холостого хода $U_{г0\ \max}$ ограничивается условиями безопасности работы сварщика и в соответствии

с ГОСТ 304—82 не должно превышать 100 В. Минимальное значение напряжения холостого хода в некоторой степени определяет стабильность горения дуги при сварке на минимальных токах и поэтому для отечественных коллекторных генераторов не должно быть меньше 45—50 В. Соображения по выбору наклона внешней характеристики и $I_{к.у}$ были приведены выше. Как видно из рис. 10.2, генератор имеет два диапазона регулирования тока. В некоторых случаях их может быть и больше. Необходимость разбиения на диапазоны вызвана отмеченными выше ограничениями напряжения холостого хода $U_{г0\ max}$. Регулирование тока за счет изменения тока возбуждения в обмотке *ОВН* возможно только начиная с максимального тока, соответствующего максимально допустимому значению напряжения холостого хода $U_{г0\ max}$, и должно быть закончено при значениях тока, соответствующих минимальным значениям напряжения холостого хода $U_{г0\ min}$ по условиям стабильности процесса. Однако в этом случае обычно получаются слишком узкие пределы регулирования тока и соответственно плохое использование генератора. Во избежание этого недостатка в схеме генераторов предусмотрена возможность подключения большего числа витков последовательной размагничивающей обмотки *ОВП*. При большем числе витков обмотки *ОВП* характеристики генератора будут более крутыми, т. е. при тех же значениях напряжения холостого хода будут меньшие значения рабочего тока и другой диапазон регулирования тока (рис. 10.2). Переключение витков обмотки *ОВП* обычно осуществляется подключением сварочного провода к другому выводному зажиму.

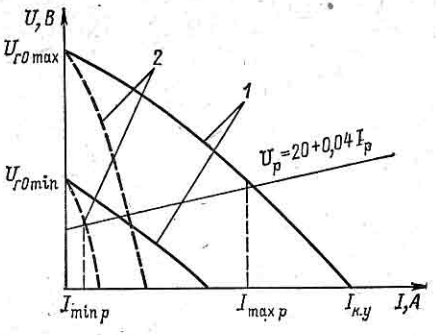


Рис. 10.2. Примерный вид крутопадающих внешних статических характеристик коллекторного генератора
1 — диапазон больших токов; *2* — диапазон малых токов

Все сказанное выше о требованиях к внешним статическим характеристикам генераторов не может опре-

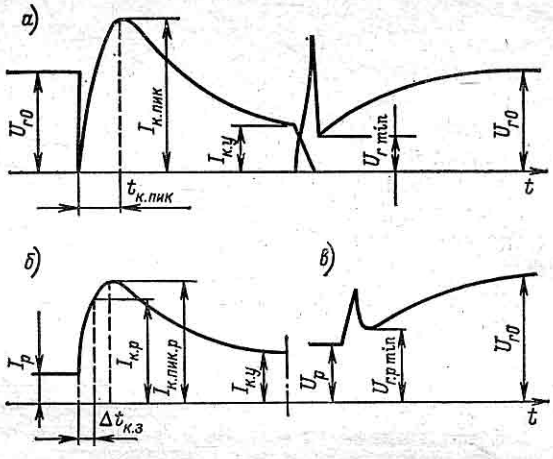


Рис. 10.3. К определению показателей качества переходных процессов сварочного генератора: *а* — холостой ход—короткое замыкание—холостой ход; *б* — рабочий режим—короткое замыкание; *в* — рабочий режим—холостой ход

делить однозначно степень пригодности генератора для ручной дуговой сварки. Дело в том, что в процессе сварки значения напряжения и тока непрерывно изменяются с большой скоростью. Эти изменения вызваны механизмом первоначального возбуждения дуги и процессами переноса электродного металла в сварочную ванну во время сварки. При зажигании дуги происходит замыкание сварочной цепи электродом на изделие и последующий ее обрыв с возбуждением дуги. В процессе горения дуги расплавленный электродный металл переносится в сварочную ванну каплями, которые периодически накоротко замыкают дуговой промежуток. После каждого короткого замыкания дугового промежутка каплей расплавленного металла происходит обрыв капли и последующее повторное возбуждение дуги. Таким образом, во время сварки генератор работает в постоянно изменяющемся динамическом режиме. Поэтому стабильность возбуждения и горения дуги, а также качество переноса металла в большой степени определяются не только статическими свойствами генератора, о которых говорилось ранее, но и его динамическими свойствами, т. е. качеством переходных процессов генератора в условиях быстроизменяющихся возмущений по длине дуги. Дина-

мические свойства генератора определяются совокупностью показателей качества его переходных процессов, определяемых по осциллограммам. Переходные процессы обычно исследуются и рассчитываются не по реальной нагрузке — сварочной дуге, а определяются нагрузкой генератора омическим сопротивлением или противо-ЭДС. Осциллограммы, позволяющие приближенно судить о динамических свойствах генератора, показаны на рис. 10.3. Осциллограмма *а* в наибольшей степени близка к процессу первоначального возбуждения дуги, *б* — к короткому замыканию дугового промежутка каплей расплавленного металла (без повторного возбуждения дуги), *в* — к обрыву процесса сварки.

В реальном процессе сварки обрыв короткого замыкания при первоначальном возбуждении дуги, как и обрыв капли, обычно происходит значительно раньше достижения током короткого замыкания установившегося значения, однако для большей наглядности и простоты дальнейшего объяснения на рис. 10.3 это не показано.

Большинство из приведенных на рис. 10.3 показателей в определенной мере позволяет судить о пригодности генератора к ручной дуговой сварке. Так, например, пиковое значение тока при коротком замыкании с холостого хода $I_{к.пик}$ или его относительное значение $I_{к.пик}/I_{к.у}$ позволяют судить о процессе первоначального возбуждения дуги; на этот процесс также влияет минимальное напряжение после обрыва установившегося короткого замыкания $U_{г\,min}$ или его относительное значение $U_{г\,min}/U_{г0}$.

Осциллограммы *б* и *в* на рис. 10.3 в большей степени характеризуют динамические свойства генератора в процессе переноса металла и повторного возбуждения дуги. Так, например, разбрызгивание металла при сварке в основном определяется значением сварочного тока в момент обрыва капли, показанной на осциллограмме *б*. Этот обрыв обычно происходит в коллекторных генераторах раньше времени $t_{к.пик}$. Однако $I_{к.пик.р}$ или $I_{к.пик.р}/I_{к.у}$ при прочих равных условиях в большой степени влияют на динамические свойства генератора. Как видно из приведенных на рис. 10.3 осциллограмм, приближенно динамические свойства генератора оцениваются по экстремальным значениям тока и напряжения генератора при мгновенном изменении длины дуги. При этом экстремальные значения тока ($I_{к.пик}$, $I_{к.пик.р}$)

больше установившихся ($I_{к.у}$, $I_р$), а экстремальные значения напряжения ($U_{г\,min}$, $U_{г.р\,min}$) меньше установившегося ($U_{г0}$). В грубом приближении при выборе или расчете генератора для ручной дуговой сварки необходимо, чтобы экстремальные значения этих величин стремились к их установившимся значениям, т. е.

$$\frac{I_{к.пик}}{I_{к.у}} \to 1; \quad \frac{I_{к.пик.р}}{I_{к.у}} \to 1; \quad \frac{U_{г\,min}}{U_{г0}} \to 1; \quad \frac{U_{г.р\,min}}{U_{г0}} \to 1.$$

Большой интерес представляет вопрос, как влияют отдельные конструктивные параметры генератора и параметры внешней цепи на указанные показатели. Это влияние описывается нелинейными дифференциальными уравнениями второго порядка, и точный учет его возможен только с использованием ЭВМ. Однако грубая оценка влияния основных параметров генератора на указанные показатели может быть осуществлена по приближенным аналитическим выражениям:

$$\frac{I_{к.пик.р}}{I_{к.у}} = \frac{U_{г0} - U_р}{U_{г0}} + \frac{U_р}{U_{г0}} \frac{R_{ст}}{R_{ст} - k_{в.г} M_п / L_{ц.в}}; \quad (10.1)$$

в случае короткого замыкания с холостого хода ($U_р = U_0$)

$$\frac{I_{к.пик}}{I_{к.у}} = \frac{R_{ст}}{R_{ст} - k_{в.г} M_п / L_{ц.в}}; \quad (10.2)$$

для экстремальных значений напряжения

$$\frac{U_{г.р\,min}}{U_{г0}} = \frac{U_р}{U_{г0}} - \frac{U_{г0} - U_р}{U_{г0}} \frac{R_{ст} - k_{в.г} M_п / L_{ц.в}}{R_{ст}}; \quad (10.3)$$

в случае обрыва установившегося короткого замыкания

$$\frac{U_{г\,min}}{U_{г0}} = \frac{R_{ст} - k_{в.г} M_п / L_{ц.н}}{R_{ст}}, \quad (10.4)$$

где $R_{ст}$ — статическое сопротивление генератора, определяемое по усредненному наклону внешней статической характеристики; $k_{в.г}$ — коэффициент возбуждения генератора, определяемый по усредненному наклону характеристики намагничивания генератора; $M_п$ — коэффициент взаимной индуктивности между цепью якоря и цепью возбуждения генератора; $L_{ц.в}$ — полная индуктивность цепи обмотки независимого возбуждения.

Из выражений (10.1)—(10.4) нетрудно убедиться, что отклонения тока и напряжения генератора во время

переходных процессов от установившихся значений будут равны нулю только в случае отсутствия магнитной связи между цепью якоря и цепью возбуждения ($M_п = 0$). Однако практически это недостижимо, так как формирование крутопадающих внешних статических характеристик осуществляется именно за счет магнитного взаимодействия этих цепей. Уменьшение этой магнитной связи в отечественных сварочных генераторах рассматриваемой конструкции в основном достигается путем разнесения последовательной обмотки возбуждения и обмотки независимого возбуждения на разные полюсные сердечники.

Для практических целей также важно знать, что, как видно из выражений (10.2) и (10.4), величины $I_{к.\,пик}/I_{к.\,у} \approx \approx U_{г0}/U_{г\,min}$, т. е. пиковое значение тока короткого замыкания и минимальное значение напряжения холостого хода обратно пропорциональны. Генератор, у которого после обрыва короткого замыкания в первый момент времени минимальное напряжение холостого хода $U_{г\,min}$ имеет относительно небольшое значение, будет иметь большой динамический пик тока короткого замыкания. По этой причине величина $U_{г\,min}$ согласно ГОСТ 304—82 является основной величиной, характеризующей качество переходных процессов сварочного генератора. В соответствии с ГОСТ 304—82 она не должна быть меньше 24 В в режиме минимального тока и 37 В в режиме номинального тока.

Кроме рассмотренных выше косвенных показателей динамических свойств сварочного генератора, важным является показатель, определяющий ток короткого замыкания $I_{к.\,р}$ в момент обрыва капли $t_{к.\,з}$. Обычно этот показатель характеризуется средней скоростью нарастания тока короткого замыкания, которая равна

$$F_р = (I_{к.\,р} - I_р)/\Delta t_{к.\,з}, \qquad (10.5)$$

где $I_{к.\,р}$ — ток короткого замыкания после истечения времени, примерно равного продолжительности короткого замыкания дугового промежутка каплей расплавленного металла $\Delta t_{к.\,з}$, которая может быть от тысячных до сотых долей секунды.

Известно, что от величины $I_{к.\,р}$ зависит разбрызгивание металла при сварке. Чем больше эта величина при прочих равных условиях, тем больше разбрызгивание металла при сварке. Исследованиями установлено, что, уменьшая эту величину, у отечественных коллекторных

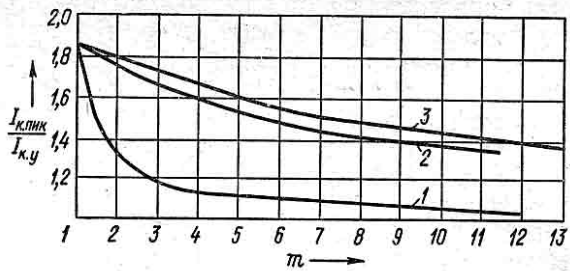


Рис. 10.4. Зависимость относительного значения динамического пика тока короткого замыкания генератора ГСО-300А от изменения параметров цепей якоря и возбуждения в диапазоне малых токов ($U_{г0}$ = = 43 В; $I_{к.у}$ = 225 А)

1 — при увеличении индуктивности рассеяния цепи независимого возбуждения; *2* — при увеличении индуктивности рассеяния цепи якоря; *3* — при увеличении омического сопротивления цепи возбуждения; *m* — кратность увеличения параметра по сравнению с исходным значением

сварочных генераторов можно уменьшить разбрызгивание металла в 2—3 раза.

Зависимость перечисленных показателей качества переходных процессов сварочных генераторов от основных параметров может быть иллюстрирована расчетными кривыми, показанными на рис. 10.4 и 10.5 для отечественного сварочного генератора ГСО-300А.

Из кривых на рис. 10.4 и 10.5 видно, что наибольшее положительное влияние на относительное значение динамического пика тока короткого замыкания, а соответственно и на относительное значение минимального напряжения после обрыва короткого замыкания оказывает в данном случае увеличение индуктивности рассеяния обмотки независимого возбуждения, которое может быть осуществлено, например, включением дополнительного дросселя в эту цепь.

Средняя скорость нарастания сварочного тока в данном случае (при малой длительности) в большей степени уменьшается от увеличения индуктивности рассеяния обмотки якоря, которое может быть осуществлено, например, включением дополнительного дросселя в сварочную цепь. Влияние омических сопротивлений цепей на рассматриваемые показатели в данном случае менее ощутимо, однако всегда их увеличение улучшает динамические свойства генератора. Качественно похожие зависимости имеют и другие типы генераторов рассматрива-

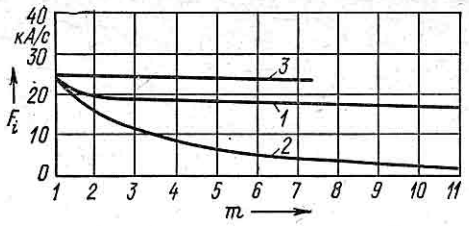


Рис. 10.5. Зависимость средней скорости нарастания тока короткого замыкания генератора ГСО-300А от изменения параметров цепей якоря и возбуждения в диапазоне малых токов ($U_{г0} = 62$ В; $I_{к.у} = 629$ А; $\Delta t_{к.з} = 0{,}006$ с)

Обозначения на кривых — см. рис. 10.4

емой схемы, однако эффективность влияния изменения параметров на показатели качества переходных процессов для каждого конкретного типа может быть другой и зависит в каждом случае от соотношения параметров генератора и длительности переходных процессов. Чем больше длительность коротких замыканий (сварка электродами больших диаметров), тем большее влияние оказывают омические сопротивления цепей и меньшее — их индуктивные сопротивления.

Следует также учесть, что рассмотренная выше взаимосвязь динамических свойств генератора с его параметрами носит приближенный характер и может быть использована на практике лишь для ориентировочного выбора основных способов улучшения сварочных свойств генераторов.

Более точный выбор таких способов требует детального исследования переходных процессов. Так, например, роль индуктивности рассеяния цепи якоря генератора не ограничивается описанным выше влиянием на экстремальные значения тока и напряжения при ступенчатых возмущениях по длине дуги. Индуктивность цепи якоря генератора благоприятно влияет на процесс сварки также и в связи с наведением в ней ЭДС самоиндукции при возникновении скоростных возмущений по длине дуги. Более подробный анализ этого влияния можно найти в литературе по сварке.

Принципы построения у генераторов жестких внешних статических характеристик для автоматизированной сварки значительно проще, чем крутопадающих характеристик. Это объясняется тем, что любой коллекторный

генератор общего применения имеет пологопадающую внешнюю статическую характеристику. Наклон этой характеристики, как известно, обусловливается в основном падением напряжения в элементах омического сопротивления цепи якоря и падением напряжения, связанным с размагничивающим действием поперечной и продольной реакции якоря. Для компенсации этих падений напряжения с целью получения более жестких характеристик сварочные генераторы имеют обычно небольшую последовательную обмотку возбуждения ОВП (см. рис. 10.1), МДС которой направлена согласно с МДС обмотки независимого возбуждения. Регулирование напряжения генератора в данном случае также осуществляется изменением тока возбуждения реостатом в цепи возбуждения. Некоторые генераторы с жесткими характеристиками выполняются с самовозбуждением. Более подробное описание схемы и принципа работы таких генераторов приведено в § 10.4. Там же даны внешние статические характеристики генераторов для автоматизированной сварки, требования к которым изложены в начале настоящего параграфа.

Требования к динамическим характеристикам генераторов для автоматизированной сварки определяются исходя из специфики процесса. В большинстве случаев при сварке электродными проволоками малого диаметра (0,6—1,6 мм) и при относительно умеренных плотностях тока перенос электродного металла осуществляется каплями, которые периодически замыкают дуговой промежуток. В этом случае стабильность процесса сварки и разбрызгивание металла в большой степени зависят от значения тока короткого замыкания в момент разрыва перемычки каплей расплавленного металла. Это значение тока, в свою очередь, зависит от установившегося тока короткого замыкания и постоянной времени сварочной цепи. При этом влияние установившегося тока короткого замыкания, а соответственно и омического сопротивления сварочной цепи тем больше, чем больше длительность короткого замыкания, что характеризует сварку на больших токах и электродными проволоками большого диаметра.

При малой длительности коротких замыканий значение тока в момент обрыва перемычки жидкого металла в большей степени зависит от индуктивности сварочной цепи.

При сварке в форсированных режимах и электродной проволокой большого диаметра процесс переноса металла — струйный, без коротких замыканий, и качество переходных процессов генератора, в том числе скорость нарастания тока, мало влияет на процесс переноса металла. Стабильность процесса сварки в этом случае в основном определяется условиями статической устойчивости дуги, т. е. формой внешних статических характеристик сварочного генератора.

10.3. ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ И ФОРМИРОВАНИЯ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕНТИЛЬНЫХ СВАРОЧНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Вентильный сварочный генератор представляет собой электрическую машину переменного тока с выпрямителем. В вентильном генераторе, в отличие от коллекторного, выпрямитель является не механическим, а полупроводниковым. Применение сильноточных полупроводниковых диодов (или тиристоров) позволило создать выпрямитель напряжения и тока для электромашинных генераторов любого конструктивного исполнения, например синхронных, индукторных, асинхронных. Поэтому в мировой практике можно встретить вентильные сварочные генераторы, выполненные на базе электрических машин переменного тока практически всех известных исполнений.

Конструктивные особенности отечественных вентильных сварочных генераторов (ВСГ). Выпускаемые в нашей стране ВСГ чаще всего выполнены на базе трехфазной индукторной одноименнополюсной электрической машины, содержащей по два пакета статора и ротора из тонколистовой электротехнической стали (рис. 10.6). Оба пакета железа статора запрессованы в стальную станину, и, следовательно, станиной они магнитно соединены. Пакеты железа ротора запрессованы на стальную втулку, расположенную на валу генератора, и, следовательно, между собой также соединены магнитно. На каждом пакете железа ротора имеются зубцы. Зубцы одного пакета сдвинуты по окружности относительно зубцов второго пакета на π электрических градусов.

Силовая обмотка якоря уложена в пазы пакета статора (общая для обоих пакетов), а тороидальная обмотка

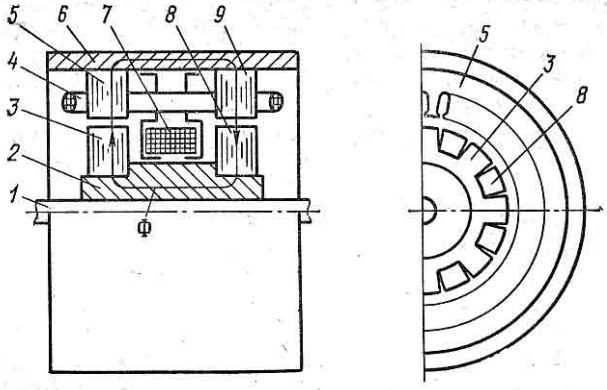


Рис. 10.6. Магнитная система двухпакетного индукторного генератора с аксиальным потоком возбуждения

1 — вал; *2* — массивная втулка на валу; *3*, *8* — пакеты железа ротора; *4* — обмотка якоря; *5*, *9* — пакеты железа статора; *6* — станина; *7* — обмотка возбуждения, прикрепленная к станине; Ф — основной магнитный поток

возбуждения размещена между пакетами железа ротора и жестко прикреплена к станине.

Из рис. 10.6 видно, что рассматриваемые вентильные генераторы не имеют обмоток, расположенных на роторе. Все обмотки — якоря и возбуждения — закреплены на статоре и при работе генератора неподвижны. Поэтому в генераторах полностью отсутствуют скользящие контактные кольца. Такое исполнение вентильных генераторов обеспечивает высокую надежность в эксплуатации.

Электромагнитные процессы в ВСГ. Основной магнитный поток машины Ф наводится в результате обтекания обмотки возбуждения постоянным током. Индуктированный магнитный поток направлен аксиально и замыкается через пакеты железа ротора, статора и станину. Зубцы одного пакета ротора, в зависимости от направления тока в обмотке возбуждения, образуют как бы северные полюсы, а зубцы второго пакета — южные. При вращении ротора каждый виток обмотки якоря пронизывается пульсирующим магнитным потоком зубцов ротора. Мгновенное значение потока, пересекающего виток якоря, целиком зависит от угла поворота зубцов ротора. В результате этого при вращении ротора в каждой фазе трехфазной обмотки статора наводятся переменные ЭДС, сдвинутые на $2\pi/3$ электрических градусов.

Принципиальная электрическая схема и принцип формирования внешних характеристик ВСГ. На рис. 10.7 представлена принципиальная электрическая схема вентильного сварочного генератора. В ней трехфазная обмотка индукторного генератора своими выводами подключена к трехфазному выпрямительному мосту *VD*, состоящему из силовых кремниевых диодов. Выпрямленным током питается сварочный пост. Необходимые для ручной дуговой сварки крутопадающие внешние статические характеристики вентильного генератора формируются в основном за счет внутренних индуктивных сопротивлений самой электрической машины. При нагрузке, т. е. при сварке от вентильного генератора, выполненного по схеме рис. 10.7, все фазы машины загружаются симметрично. Фазное напряжение нагруженного генератора в общем случае может быть определено в векторном виде следующим образом:

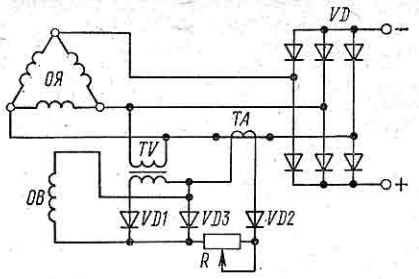


Рис. 10.7. Принципиальная электрическая схема вентильного сварочного генератора

ОЯ — обмотка якоря; *ОВ* — обмотка возбуждения; *TV*, *TA* — трансформаторы напряжения и тока; *VD* — силовой вентильный блок; *VD1*, *VD2*, *VD3* — диоды в цепи возбуждения; *R* — реостат для управления значением сварочного тока

$$\dot{U} = \dot{E}_0 - j\dot{I}_d x_d - j\dot{I}_q x_q - \dot{I} r_\Phi \ldots, \qquad (10.6)$$

где E_0 — ЭДС генератора при холостом ходе; I, I_d, I_q — фазный ток, продольная и поперечная составляющие фазного тока; x_d, x_q — индуктивные сопротивления машины по продольной и поперечной осям; r_Φ — активное сопротивление фазы.

В режиме сварки, как показано векторной диаграммой на рис. 10.8, соответствующей выражению (10.6), падение напряжения генератора от значения E_0 при холостом ходе до значения U при нагрузке можно получить преимущественно за счет продольно размагничивающей составляющей реакции якоря $jI_d x_d$ (поскольку $jI_d x_d \gg I_q x_q$). Эта продольно размагничивающая составляющая реакции якоря как бы создает магнитный поток, встречный основ-

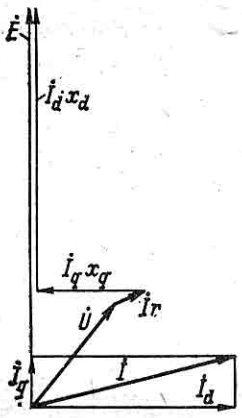


Рис. 10.8. Векторная диаграмма фазных величин в режиме сварки

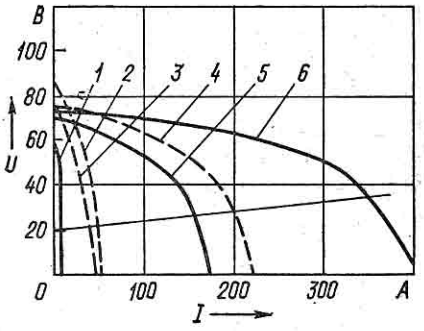


Рис. 10.9. Внешние статические вольт-амперные характеристики вентильного сварочного генератора

1, 2 — диапазон малых токов; *3, 4* — диапазон средних токов; *5, 6* — диапазон больших токов (см. рис. 10.10). Характеристики *1, 3, 5* — при введенном реостате R (рис. 10.7); характеристики *2, 4, 6* — при выведенном реостате ($R = 0$)

ному магнитному потоку, создаваемому обмоткой возбуждения. Поскольку в режимах, близких к короткому замыканию, превалирует продольная составляющая тока якоря I_d, индуктивное падение напряжения внутри машины почти целиком зависит от продольного индуктивного сопротивления машины x_d. Значение сопротивления x_d, обеспечивающее падающие внешние характеристики должной крутизны, зависит от геометрических размеров магнитопровода и обмотки якоря, ее параметров и геометрического расположения на статоре.

Плавное регулирование крутизны внешней вольт-амперной характеристики, другими словами, плавное регулирование сварочного тока осуществляется изменением ЭДС холостого хода E_0 посредством изменения тока возбуждения генератора.

Внешние статические вольт-амперные характеристики вентильного генератора представлены на рис. 10.9.

Принцип работы схемы возбуждения генератора и управление значением сварочного тока. Генератор работает с самовозбуждением от силовой цепи. После запуска генератора начальное самовозбуждение происходит от

остаточного магнетизма в массивных участках магнитной цепи машины (втулка на валу, станина), и на зажимах обмоток якоря (рис. 10.7) появляется небольшая ЭДС (3—4 В). Трансформатор *TV* через выпрямитель *VD1* начинает питать обмотку возбуждения *OB* постоянным током, ЭДС на зажимах обмотки якоря начинает расти, ток возбуждения также увеличивается и генератор возбуждается до напряжения холостого хода. С появлением сварочного тока обмотку возбуждения начинает питать и трансформатор *TA* через выпрямитель *VD2*. Поскольку естественная внешняя характеристика генератора, как было показано раньше, падающая, то с ростом нагрузки напряжение на зажимах генератора уменьшается и составляющая тока возбуждения от трансформатора напряжения *TV* начинает также уменьшаться, а составляющая тока возбуждения от трансформатора тока *TA* с ростом нагрузки увеличивается. Ввиду того что мгновенные значения амплитуд вторичных напряжений трансформаторов *TV* и *TA* сдвинуты во времени (по фазе), в режиме любой нагрузки оба трансформатора через свои выпрямители *VD1* и *VD2* параллельно питают обмотку возбуждения до режима короткого замыкания. При коротком замыкании работает только трансформатор *TA*. Вентиль *VD3* служит для разрядки электромагнитной энергии, накопленной в индуктивных катушках обмотки возбуждения, и пропускает импульсы тока в промежутках, когда мгновенные значения ЭДС от трансформаторов *TV* и *TA* имеют обратный знак (вентили *VD1* и *VD6* заперты). Таким образом, в вентилях *VD1*, *VD2* и *VD3* протекают импульсы выпрямленного тока, сдвинутые во времени, в результате чего обмотка возбуждения питается непрерывным постоянным током.

Реостатом *R*, включенным в цепь возбуждения, регулируется эффективность обратной связи по току и, следовательно, плавно регулируется крутизна внешних вольт-амперных характеристик. Реостат *R* выполнен с дистанционным кабелем, сварщик его может перенести непосредственно на свое рабочее место.

Реостатом *R* плавно регулируется сварочный ток только в пределах диапазона. Грубое регулирование сварочного тока осуществляется скачкообразным изменением внутренних сопротивлений (индуктивных x_d и x_q и активного $r_ф$) посредством переключения схемы обмотки якоря согласно рис. 10.10.

Рассмотрим, как изменяется внутреннее сопротивление машины и, следовательно, крутизна внешних характеристик при постоянном токе возбуждения $I_в = \text{const}$ при переходе от одной схемы (рис. 10.10) к другой. При переключении трехфазной обмотки якоря со схемы *а* на схему *б* (тогда одна из двух параллельных катушечных групп каждой фазы полностью отключается, а остаются включенными только те катушечные группы, которые размещены на той же самой половине расточки статора) индуктивное сопротивление, приведенное к фазе, возрастает в два раза, что ведет к двукратному увеличению крутизны внешней характеристики. Если трехфазную обмотку якоря переключить со схемы *а* на схему *в*, то индуктивное сопротивление, приведенное к фазе, возрастает в восемь раз и, следовательно, в восемь раз увеличивается крутизна внешней характеристики. А если перейти со схемы *б* на схему *в*, крутизна внешней характеристики увеличивается в четыре раза. При всех этих переключениях ЭДС холостого хода генератора сохраняется неизменной.

Таким образом, сочетанием грубого регулирования тока (путем переключения из одного диапазона в другой) и подрегулировки тока возбуждения реостатом R (см. рис. 10.7) в пределах каждого диапазона регулируется ток вентильного сварочного генератора.

Переходные процессы и сварочные свойства. Сварочные свойства вентильного генератора, как и коллекторного, зависят от статических характеристик переходных

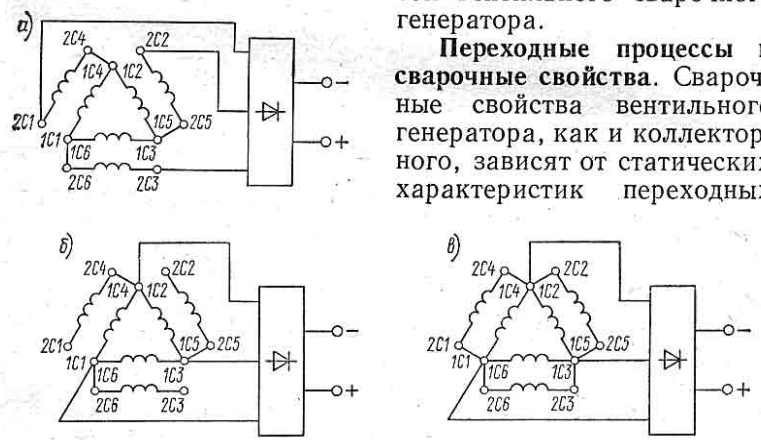


Рис. 10.10. Схемные соединения двух трехфазных обмоток на статоре генератора: *а* — диапазон малых токов; *б* — диапазон средних токов; *в* — диапазон больших токов

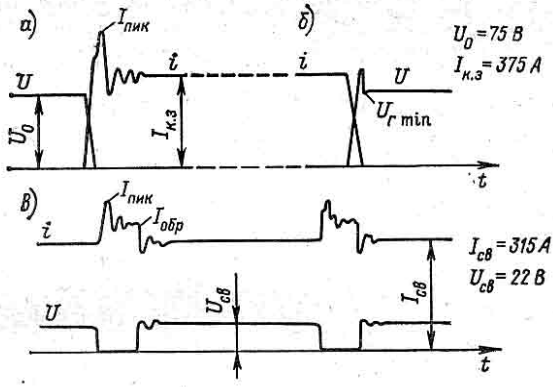


Рис. 10.11. Кривые мгновенных значений тока и напряжения при переходных процессах: *а* — холостой ход—короткое замыкание; *б* — короткое замыкание—холостой ход; *в* — режим сварки

процессов, происходящих в электрической машине во время сварки. При сварке от вентильного генератора характер протекания переходных процессов, обусловленных изменением длины дугового промежутка между электродом и деталью, зависит в первую очередь от частоты тока якоря и от внутренних параметров генератора. Установлено, что в случае применения трехфазных обмоток якоря хорошие сварочные свойства получаются при частотах тока якоря вентильного генератора $f = 150 \ldots$ $\ldots 400$ Гц. Выпрямленный ток короткого замыкания достигает своего пикового значения $I_{к.\,пик}$ приблизительно через полпериода, т. е. через время $t = 1/(2f)$ от начала короткого замыкания. Поэтому увеличение частоты тока якоря вентильного генератора как бы ускоряет переходный процесс и приводит к тому, что при сварке капля расплавленного электродного металла обрывается уже при работе генератора на спадающей части кривой выпрямленного тока короткого замыкания (рис. 10.11). Ток $I_{обр}$ в момент обрыва капли становится значительно меньше своего максимального значения $I_{к.\,пик}$. Это обстоятельство позволяет существенно уменьшить разбрызгивание электродного металла при сварке от вентильного генератора.

Важное значение для качества сварки и стабильности горения дуги имеет процесс восстановления напряжения холостого хода после обрыва короткого замыкания. Про-

цесс восстановления напряжения зависит от инерционности цепи возбуждения и поэтому в индукторных одноименнополюсных генераторах длится сравнительно долго (0,25—1,5 с). В этом случае скорость нарастания напряжения после обрыва короткого замыкания мала по сравнению со скоростями процессов, происходящих в сварочной цепи. Поэтому для вентильных генераторов рассматриваемого типа стабильность повторного возбуждения дуги характеризуется значением напряжения, которое появляется на зажимах генератора в момент обрыва короткого замыкания. Это мгновенное значение минимального напряжения $U_{\text{г. min}}$ в первый момент после обрыва короткого замыкания равно

$$U_{\text{г min}} = \sqrt{3}\, I_{\text{обр}} x'_d \ldots, \qquad (10.7)$$

где $I_{\text{обр}}$ — сварочный ток в момент обрыва короткого замыкания; x'_d — переходное индуктивное сопротивление по продольной оси генератора.

Поскольку обрыв капли при сварке (рис. 10.11), как правило, происходит при значениях тока, бо́льших рабочего, значение напряжения $U_{\text{г min}}$ при сварке от вентильного генератора всегда удовлетворяет условию $U_{\text{г min}} = 20 + 0{,}04I$ (в вольтах) и процесс горения дуги отличается высокой стабильностью.

Вследствие благоприятных переходных процессов вентильные генераторы отличаются хорошими сварочными свойствами, в том числе небольшими потерями электродного металла (небольшим разбрызгиванием), стабильным горением и эластичностью дуги. Благодаря этим особенностям от этих генераторов легко может вести сварку и сварщик, не имеющий большого опыта.

Следует отметить, что начальное зажигание дуги при сварке от вентильных генераторов несколько иное, нежели при сварке от других источников. Как было сказано раньше, при повышенной частоте уменьшается время существования ударного тока при коротком замыкании. Вследствие этого в момент зажигания дуги электродом небольшой ударный ток выделяет и не столь значительное количество тепловой энергии. Поэтому дуга от короткого замыкания сварочной цепи касанием электродом детали загорается трудно. Для того чтобы легко зажечь дугу, необходимо концом электрода провести по детали, как

при зажигании спички. В этом случае дуга легко зажигается, не выбрызгивая электродный металл и не выплавляя кратера в детали.

10.4. СВАРОЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Сварочный преобразователь представляет собой электромашинную установку, состоящую из приводного электродвигателя и сварочного генератора.

Выпускаемые в настоящее время сварочные преобразователи предназначены для работы как в закрытых помещениях, так и на открытом воздухе. При работе на открытом воздухе преобразователи должны быть защищены навесом от попадания на них атмосферных осадков и солнечной радиации. Преобразователи имеют защищенное исполнение с самовентиляцией, на шарикоподшипниках, снабжены колесами для передвижения на небольшие расстояния. В качестве привода применены короткозамкнутые асинхронные трехфазные электродвигатели. Преобразователи могут работать нормально только при направлении вращения, указанном стрелкой на подшипниковом щите со стороны генератора. Электродвигатели преобразователей могут работать при соединении их фаз звездой или треугольником в зависимости от значения линейного напряжения питающей сети. В большинстве случаев электродвигатели выпускаются при соединении их фаз звездой для линейного напряжения 380 В. В каждом конкретном случае применения преобразователей соединение фаз электродвигателей необходимо выполнить в соответствии с указаниями, содержащимися в инструкциях по эксплуатации этих машин.

Пуск и остановка приводного двигателя осуществляются при помощи пакетного выключателя. Пакетный выключатель служит для прямого пуска и не защищает двигатель.

Сварочные преобразователи с коллекторными генераторами.

Преобразователи типов ПСО-315МУ2, ПСО-300-2У2 и ПД-502У2 предназначены для питания постоянным током одного сварочного поста при ручной дуговой сварке, наплавке и резке металлов штучными электродами, а также для питания сварочных цепей автоматов и полуавтоматов при дуговой сварке под слоем флюса.

Преобразователь состоит из следующих основных частей: индуктора генератора с главными и добавочными

Таблица 10.1

Технические данные	ПСО-315МУ2	ПСО-300-2У2	ПД-305У2	ПД-502У2
Номинальный сварочный ток, А	315			500
Пределы регулирования сварочного тока, А	100—315 45—315 *		45—350	75—500
Рабочее напряжение при номинальном сварочном токе, В	32			40
Напряжение холостого хода генератора, В, не более	90			
Относительная продолжительность нагрузки, ПН, %	60			
Продолжительность цикла сварки, мин	5			10
Мощность генератора, кВт	10,2			20
Тип генератора	ГСО-300М	ГСО-300	ГД-317	ГД-502
Тип электродвигателя	АО2-62-2СХУ1	4АВ160А4У2	АВ2-51-2В	АВ2-71-2СУ2
Линейное напряжение трехфазной питающей сети, В	380		220 или 380	
Частота питающей сети, Гц	50			50 или 60
Частота вращения, об/мин	2915	1460 или 1750	2900	2900 или 3480
Ток электродвигателя $\Delta/\curlyvee$, А	32,5	50,6/29,3	29,8/17,2	97/56
Мощность электродвигателя, кВт	17	15	10	30
Габаритные размеры, мм:				
длина	1225	1030	1200	1065
ширина	485	590	537	650
высота	780	830	845	935
Масса, кг	393	435	280	500
Исполнение	Раздельное		Однокорпусное	

* В преобразователях, выпускаемых с 1 января 1980 г.

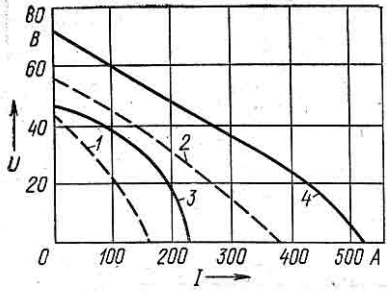


Рис. 10.12. Внешние статические характеристики генератора преобразователя ПСО-315МУ2

1, 2 — диапазон малых токов; *3, 4* — диапазон больших токов; *2, 4* — реостат выведен; *1, 3* — реостат введен

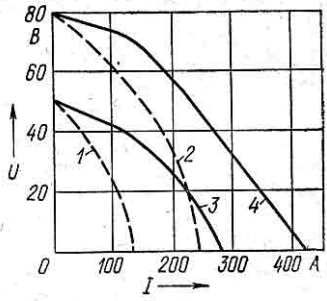


Рис. 10.13. Внешние статические характеристики генератора преобразователя ПСО-300-2У2

Обозначения кривых — см. рис. 10.12

полюсами, якоря генератора, статора двигателя, токоотвода, распределительного устройства с пускорегулирующей аппаратурой и ходовой части. Технические данные преобразователей приведены в табл. 10.1.

Сварочные преобразователи ПСО-300-2У2, ПСО-315МУ2 и ПД-502У2 работают по одному и тому же принципу и отличаются между собой конструктивным исполнением.

Сварочные генераторы ГСО-300 и ГСО-300М преобразователей ПСО представляют собой однопостовые четырехполюсные коллекторные машины постоянного тока с самовозбуждением, имеющие последовательную размагничивающую обмотку. Принцип работы и электрическая схема генератора ГСО-300М описаны в § 10.2. Генератор ГСО-300 — такая же машина, отличающаяся от ГСО-300М частотой вращения.

Регулирование сварочного тока генератора осуществляется реостатом проволочного типа, размещенным в распределительном устройстве (плавная настройка), и подключением сварочного кабеля к соответствующему зажиму доски зажимов низкого напряжения (грубая настройка).

Внешние статические характеристики генераторов преобразователей представлены на рис. 10.12 и 10.13.

Сварочный генератор преобразователя ПД-502У2 в отличие от описанных выше генераторов типа ГСО-300 имеет независимое возбуждение. Независимая обмотка

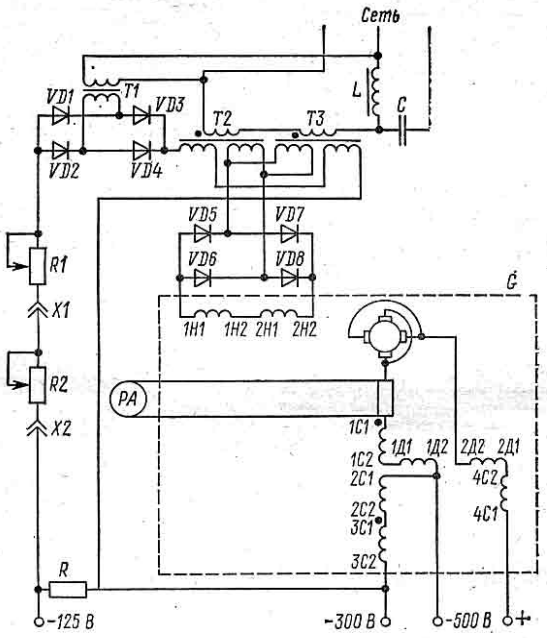


Рис. 10.14. Принципиальная электрическая схема генератора преобразователя ПД-502У2

G — генератор постоянного тока; *1Н1—2Н2* — шунтовые обмотки возбуждения; *1С1—4С2* — серийные обмотки возбуждения; *1Д1—2Д1* — обмотки дополнительных полюсов; *Т1*, *Т2* и *Т3* — трансформаторы для питания цепи возбуждения; *РА* — амперметр с шунтом

возбуждения питается от сети переменного трехфазного тока через управляемый индуктивно-емкостный преобразователь напряжения. Обмотка возбуждения включается одновременно с пуском электродвигателя преобразователя.

Схема управления сварочным генератором (рис. 10.14) выполняет две функции:

обеспечивает плавное регулирование сварочного тока в пределах каждого диапазона токов;

обеспечивает стабилизацию сварочного тока при колебаниях напряжения питающей сети.

Возбуждение генератора осуществляется питанием его шунтовой обмотки *1Н1—2Н2* от сети через параллельно соединенные вторичные обмотки трансформаторов *Т1* и *Т2* и выпрямительный мост *VD5 — VD8*. Сварочный

ток регулируется реостатом *R2* путем изменения значения постоянного тока, подмагничивающего магнитопроводы трансформаторов *T2* и *T3*. Увеличение тока подмагничивания вызывает уменьшение тока возбуждения и соответственно уменьшение сварочного тока.

Значение сварочного тока зависит от тока возбуждения, а следовательно, и от напряжения холостого хода генератора. Чтобы во всем диапазоне сварочных токов напряжение холостого хода не выходило за пределы 50—90 В, последовательная размагничивающая обмотка генератора выполнена с отводами, позволяющими включать только часть ее витков и тем самым регулировать ее размагничивающее действие. Для уменьшения нижнего предела сварочного тока до 75 А к генератору подключен балластный резистор *R*, расположенный в распределительном устройстве.

Переключение размагничивающей обмотки и балластного резистора производится на доске зажимов генератора, где указаны верхние предельные значения сварочных токов: 125, 300 и 500 А. Плавное регулирование сварочного тока и напряжения холостого хода в пределах каждой из ступеней производится реостатом обмотки возбуждения *R2*, смонтированным на выносном пульте дистанционного управления, гибкий провод которого посредством штепсельного разъема подключается к доске зажимов генератора. Контроль значения сварочного тока осуществляется амперметром на распределительном устройстве.

Стабилизация сварочного тока при колебаниях напряжения сети достигается следующим образом: при увеличении напряжения сети ток, протекающий от трансформатора *T1* через диоды *VD1—VD4* и подмагничивающий магнитопроводы трансформаторов *T2* и *T3*, возрастает, компенсируя тем самым увеличение вторичного напряжения этих трансформаторов из-за увеличения напряжения сети; в результате ток возбуждения, а следовательно, и сварочный ток не изменяют своего значения.

Преобразователь типа ПСГ-500-1У3 предназначен для питания постоянным током одного поста дуговой автоматической и полуавтоматической сварки в среде защитных газов плавящимся электродом с постоянной скоростью подачи при токе 60—500 А. Преобразователь внешне весьма похож на преобразователи ПСО-300-2У2 и ПД-502У2. Пусковая и регулировочная аппаратура

смонтирована в распределительном устройстве, установленном на корпусе преобразователя. В этом устройстве размещены регулировочный реостат, подрегулировочный резистор, пакетный выключатель электродвигателя, вольтметр, помехоподавляющий фильтр и доски зажимов высокого и низкого напряжения.

Технические данные преобразователя приведены ниже:

Номинальный сварочный ток, А	500
Пределы регулирования сварочного тока, А	60—500
Рабочее напряжение при номинальном сварочном токе, В	60
Пределы регулирования напряжения, В	16—40
Относительная продолжительность нагрузки, ПН, %	60
Продолжительность цикла сварки, мин	10
Мощность генератора, кВт	20
Тип генератора	ГСГ-500-1
Тип электродвигателя	АВ2-71-2У2
Линейное напряжение трехфазной питающей сети, В	220 или 380
Частота питающей сети, Гц	50 или 60
Частота вращения, об/мин (при 50 или 60 Гц)	2900 или 3480
Ток электродвигателя, $\Delta/\curlywedge$, А	97/56,2
Мощность электродвигателя, кВт	30
Габаритные размеры, мм:	
длина	1050
ширина	620
высота	890
Масса, кг	500
Исполнение	Однокорпусное

Сварочный генератор преобразователя представляет собой четырехполюсную машину с самовозбуждением. Обмотка самовозбуждения расположена на всех главных полюсах и питается от щеток генератора. Генератор имеет жесткие внешние характеристики в пределах 60—500 А с наклоном не более $\pm 0{,}04$ В/А, обеспечивающие автоматизированную сварку в среде защитного газа (рис. 10.15). Надежное самовозбуждение при минимальных напряжениях холостого хода обеспечивается за счет пары главных полюсов, имеющих более насыщенные сердечники (с вырезами в средней части). Регулирование напряжения генератора производится реостатом, включенным в цепь катушек возбуждения, расположенных на ненасыщенных полюсных сердечниках.

Для обеспечения нормальной коммутации генератор имеет дополнительные полюсы, катушки которых последовательно включены в цепь якоря.

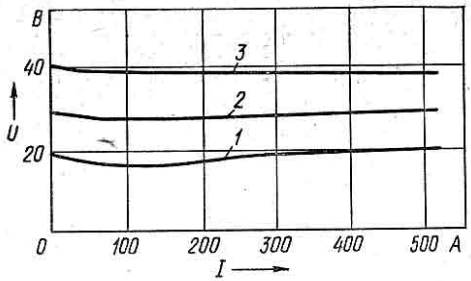


Рис. 10.15. Внешние статические характеристики генератора преобразователя ПСГ-500-1УЗ

1 — реостат введен; *3* — реостат выведен; *2* — промежуточное положение ползунка реостата

Сварочно-зарядная установка УДЗ-101УЗ предназначена для однопостовой ручной дуговой сварки, наплавки и резки металлов постоянным током 15—135 А, а также для зарядки, разрядки и проведения контрольно-тренировочных циклов аккумуляторных батарей напряжением 6; 12 и 24 В. Установка состоит из сварочного преобразователя ПД-101УЗ с генератором коллекторного типа и зарядно-разрядного устройства УЗР-15УЗ.

Технические данные установки приведены ниже:

Номинальный сварочный ток, А	125
Пределы регулирования сварочного тока, А	15—135
Рабочее напряжение при номинальном сварочном токе, В	25
Напряжение холостого хода генератора, В, не более	90
Относительная продолжительность нагрузки, ПН, %	60
Продолжительность цикла сварки, мин	5
Мощность генератора, кВт	3,12
Тип генератора	ГД-101
Тип электродвигателя	АВ2-42-2У2
Мощность двигателя, кВт	7,5
Частота вращения, об/мин	2910
Частота питающей сети, Гц	50
Линейное напряжение питающей сети, В	220 или 380
Ток двигателя, $\Delta/\curlywedge$, А	25,4/14,7
Масса преобразователя, кг	230
Габаритные размеры, мм:	
длина	1140
ширина	490
высота	645
Максимальный ток зарядки-разрядки, А	15
Напряжение питания, В	14—90
Режим работы	Продолжительный
Масса зарядно-разрядного устройства, кг	16

Габаритные размеры, мм:

длина	450
ширина	260
высота	547

Сварочный генератор преобразователя — четырехполюсная коллекторная машина постоянного тока с самовозбуждением, с последовательной размагничивающей обмоткой. Внешние характеристики — крутопадающие, получаемые за счет размагничивающего действия последовательной обмотки. Генератор имеет три диапазона регулирования сварочных токов: «больших токов» 60—135 А, когда включена часть витков последовательной размагничивающей обмотки; «средних токов» 30—65 А, когда включено полное число витков размагничивающей обмотки; «малых токов» 15—35 А, когда в цепь «средних токов» последовательно включен дополнительный балластный резистор. Регулятор тока сварочного генератора выполнен съемным. Съемный реостат позволяет регулировать сварочный ток с расстояния до 20 м. Максимальный ток реостата 4 А.

Внешние характеристики генератора установки представлены на рис. 10.16.

Зарядно-разрядное устройство УЗР-15У3 состоит из регулируемых реостатов ступенчатого и плавного регулирования, пакетного переключателя режима работы (зарядка или разрядка), зажимов для подключения устройства к генератору и к аккумуляторам и контрольно-измерительной аппаратуры зарядного (разрядного) тока и напряжения.

Все эти элементы, кроме реостата плавного регулирования, размещены в одном металлическом корпусе. Реостат плавного регулирования выполнен отдельным. Его подключение производится с помощью штепсельного разъема. Соединение устройства УЗР-15У3 со сварочным генератором (зажимы «—» и «125») осуществляется двухжильным проводом сечением 2,5 мм^2, входящим в комплект поставки устройства. Необходимый ток зарядки устанавливается при холостом ходе преобразователя с помощью реостатов ступенчатого и плавного регулирования. Полное сопротивление реостата ступенчатого регулирования 16,315 Ом, а реостата плавного регулирования 1,120 Ом. Максимальный ток реостатов 15 А.

Зарядно-разрядное устройство УЗР-15У3 может быть использовано в комплекте не только со сварочным

преобразователем ПД-101УЗ, но и с любым другим источником постоянного тока, имеющим напряжение 14—90 В.

Сварочный преобразователь ПД-305У2 с вентильным генератором предназначен для питания постоянным током одного сварочного поста при электродуговой сварке, резке и наплавке металлов. Преобразователь состоит из следующих основных частей: индукторного генератора, выпрямительного устройства, приводного электродвигателя, устройства управления с пускорегулирующей аппаратурой и ходовой части.

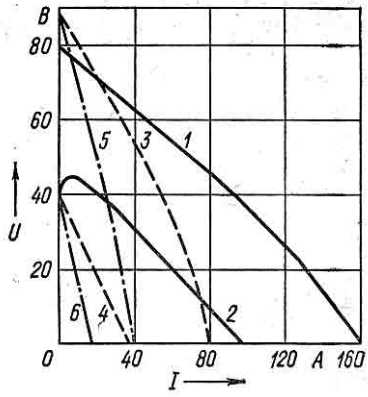


Рис. 10.16. Внешние характеристики генератора установки УДЗ-101УЗ

1, 2 — диапазон больших токов; *3, 4* — диапазон средних токов; *5, 6* — диапазон малых токов

Сварочный генератор преобразователя — трехфазная одноименнополюсная индукторная электрическая машина повышенной частоты (300 Гц) с выпрямительным устройством. Силовая обмотка и обмотка возбуждения генератора — неподвижные. Ротор генератора, являющийся индуктором, представляет собой два пакета из электротехнической стали, имеющие зубцы. Пакеты расположены на общем валу таким образом, что зубцы одного пакета сдвинуты на 180° относительно зубцов второго пакета.

Выпрямительное устройство генератора представляет собой блок силовых кремниевых вентилей, собранных по трехфазной мостовой схеме выпрямления. Для принудительного охлаждения блока вентилей и частично обмоток генератора предусмотрен осевой вентилятор. Центробежный вентилятор, расположенный на валу между электродвигателем и индуктором генератора, служит для охлаждения электродвигателя и ротора генератора.

В устройстве управления, расположенном в верхней части корпуса преобразователя, размещены пускорегулирующая аппаратура и элементы схемы управления генератором. Регулятор сварочного тока в виде реостата обмотки возбуждения проволочного типа выполнен съемным

(переносным) и посредством гибкого провода со штепсельным разъемом позволяет осуществлять дистанционное регулирование сварочного тока на расстоянии до 20 м.

Принцип работы генератора преобразователя и способы формирования его внешних характеристик подробно описаны в § 10.3. Генератор работает с самовозбуждением от силовой цепи. Начальное возбуждение обеспечивается остаточным магнетизмом магнитной цепи машины.

10.5. СВАРОЧНЫЕ АГРЕГАТЫ

Условия работы сварочных агрегатов. Сварочные агрегаты относятся к категории передвижных энергетических установок, приспособленных для работы в полевых условиях независимо от временного или постоянного размещения на транспортном средстве. Они предназначены для ручной дуговой сварки и резки металлов штучными электродами и полуавтоматической и автоматической дуговой сварки под флюсом.

Под условиями работы агрегатов понимают окружающую среду, в которой агрегаты должны длительно и надежно работать, при этом их обслуживание должно соответствовать требованиям инструкции по эксплуатации. Мощность, развиваемая агрегатом в условиях, соответствующих расчетным, должна быть не менее номинальной.

Все выпускаемые в стране агрегаты относятся к категории I, т. е. предназначены для эксплуатации на открытом воздухе (воздействие совокупности климатических факторов, характерных для данного макроклиматического района).

Сварочные агрегаты подразделяются:

по типу первичного двигателя — на агрегаты с бензиновыми и дизельными двигателями;

по способу охлаждения двигателя — с воздушным и жидкостным охлаждением;

по типу сварочного генератора — на коллекторные и вентильные;

по числу сварочных постов — на однопостовые и многопостовые;

по роду тока — переменного и постоянного тока.

Основные технические характеристики сварочных агрегатов приведены в табл. 10.2—10.6.

Таблица 10.2

Технические данные	Марка бензинового агрегата							
	АСБ-3007	АДБ-309	АДБ-311	АСБ-300М	АДБ-318	АДБ-3120	ПАС-400-У1	АБ-8АСБ-300М
Номинальный сварочный ток, А	315			250	315		400	315
Пределы регулирования сварочного тока, А	45—315	15—350	15—315	45—300	45—350	15—350	120—600	75—315
Рабочее напряжение при номинальном сварочном токе, В	32			30	32		40	32
Напряжение холостого хода, отрегулированное на номинальный режим, В	Не более 100							
Продолжительность цикла сварки, мин	5						—	5
Относительная продолжительность нагрузки, ПН, %	60 (315 А) 100 (240 А)	35 (350 А) 60 (315 А) 100 (240 А)	60 (315 А) 100 (240 А)	35 (300 А) 60 (250 А)	35 (350 А) 60 (315 А) 100 (240 А)		45 (500 А) 100 (400 А)	60 (315 А) 100 (240 А)

Продолжение табл. 10.2

Технические данные	Марка бензинового агрегата							
	АСБ-3007	АДБ-309	АДБ-311	АСБ-300М	АДБ-318	АДБ-3120	ПАС-400-У1	АБ-8АСБ-300М
Частота вращения, об/мин	2000		1500	3000	2000		1600	3000
Тип двигателя	ЗМЗ-320-01			АБ8М («Москвич»-408)	ЗМЗ-320-01		ЗИЛ-164	АБ8М («Москвич»-408»)
Тип сварочного генератора	ГСО-300-5	ГД-303	ГД-305	ГСО-300М	ГД-312	ГД-314	СГП-3-У1	ПГС-300А
Вместимость топливного бака, л	60	66		35	66		50	—
Расход топлива при номинальном режиме, кг/ч	5,1		4,3	5,5	4,4		11,0	5,5
Масса незаправленного агрегата без комплектации, кг	635	750	800	550	710	690	1990	520
Габариты, мм:								
длина	1130	1892	1890	1680	1890	1900	2700	1690
ширина	850	880	880	870	880	900	900	810
высота	1165 (1685)	1200 (1655)	1200 (1655)	1080	1200 (1655)	1200 (1405)	1550	1080

Главным оценочным параметром сварочных агрегатов является номинальное значение сварочного тока. Стандартизованный ряд номинальных токов (в амперах) сварочных агрегатов: 125; 160; 250; 315; 400; 500. В настоящее время агрегаты выпускаются на номинальный ток 250; 315; 400; 500 А.

Основными элементами агрегатов являются: двигатель внутреннего сгорания (бензиновый или дизельный)—сварочный генератор; пульт управления с контрольно-измерительными приборами; реостат регулирования сварочного тока; топливный бак; аккумуляторная батарея для электростартерного пуска двигателя агрегата или пускового двигателя; металлический капот для защиты от пыли и атмосферных осадков; рама агрегата; запасные части, инструмент и принадлежности.

Корпуса двигателя и генератора агрегатов соединяются, как правило, между собой жестко фланцевым сочленением. При этом двигательно-генераторный блок представляет собой жесткую единую конструкцию и устанавливается на раму непосредственно или через резиновые амортизаторы. Валы двигателя и генератора соединяются между собой полужесткой муфтой.

Режим работы двигателей внутреннего сгорания в сварочных агрегатах традиционно принято считать стационарным и двигатели причислять к стационарным. В данном случае стационарность работы двигателя в составе сварочного агрегата определяется постоянством частоты вращения.

Двигатели внутреннего сгорания, применяемые в агрегатах, имеют автоматический регулятор, поддерживающий постоянную, в пределах регламентированной допустимости отклонений (8 % наклона характеристики регулятора), частоту вращения приводного двигателя независимо от значения сварочного тока. Это необходимо для обеспечения стабильного и качественного процесса сварки. Чисто стационарным режимом можно характеризовать работу двигателя в составе многопостового сварочного агрегата, у которого генератор имеет жесткую характеристику, а падающая характеристика на каждом посту формируется балластным реостатом. Нагрузка при этом может быть частичной или полной, но в пределах относительно большой длительности времени она остается постоянной. Работа двигателя в составе однопостового

Таблица 10.3

Технические данные	Марка дизельного агрегата								
	АДД-303	АДД-305	АДД-3112	АСД-300М	АСД-300Т	АДД-304	АСД-3-1 / АСДП-500	АСДП-500Г	АДД-502
Номинальный сварочный ток, А	315					250	500		2×315/500
Пределы регулирования сварочного тока, А	45—315	45—35	30—350	45—315		45—300	120—500	До 600	2 (60—330) / (250—500)
Рабочее напряжение при номинальном сварочном токе, В	32						40	55	2×32/40
Напряжение холостого хода, отрегулированное на номинальный режим, В	Не более 100							55	Не более 100
Продолжительность цикла сварки, мин	5						10		5/10
Относительная	60 (315 А)	35 (350 А)		60 (315 А)		60 (250 А)	60 (500 А)	60	35

Продолжительность нагрузки, ПН, %	100 (240 А)	60 (315 А) 100 (240 А)		100 (240 А)		35 (300 А)	100 (400 А)	(600 А) 100 (500 А)		(2×330 А) 60 (2×315 А) 80 (500 А)
Частота вращения агрегата, об/мин	1600			1500		1800/2200	1500			1800
Тип двигателя	Д144			4ч8,5/11		2ч8,5/11	ЯАЗ-М204Г			Д144
Тип генератора	ГСО-300-12	ГД-310	ГД-3120	ГСО-300	ГД-309	ГД-307	СГП-3-УЗ	ГСМ-500		—
Вместимость топливного бака, л	35		54		40		25	150		100
Расход топлива при номинальном режиме, кг/ч	4,35			3,6		2,9	11,8	9,5		5,7/6,40
Масса незаправленного агрегата без комплектации, кг	900		895	920	1100	850	2500/4400	4550		1600/3500 *
Габариты, мм:										
длина	1915		1900	1915	1980	1820	2820/6250	6350		2550/6240 *
ширина	895		900	1100	900	930	2115/2350	2350		1200/2350 *
высота	1250		1200	895	1350	1450	1115/2785	2785		1270/2040 *

* В знаменателе данные относятся к агрегату с прицепом.

Технические данные	Марка бензинового агрегата	
	АСБ-300-7	АДБ-309
Тип генератора	ГСО-300-5	ГД-303
Номинальная частота вращения, об/мин	2000	
Номинальная мощность генератора, кВт	10,8	
Якорь		
Марка провода	МГМ	ППМ
Размер провода, мм²	2,44×10,8	2,5×9
Шаг по пазам	1,11	
Шаг по коллектору	1—42	
Число холостых секций	1	
Сопротивление обмотки при 20 °С, Ом	0,0109	0,0128
Масса меди (алюминия), кг	15	12,5
Главные полюсы		
Воздушный зазор, мм	$1^{+0,1}_{-0,2}$	
Число витков обмотки на полюсе	330/5+4	
Марка провода	ПСД/АМ	ПЭТВ/АДО
Размер провода, мм	1,88/4,4×18 3,95×15,6	1,88/4,44×18
Сопротивление двух катушек, Ом	$\frac{2,2}{0,00088+0,0011}$	$\frac{1,94}{0,0007+0,000888}$
Масса меди (алюминия), кг	8,92/1,516	7,76/1,516
Дополнительные полюсы		
Воздушный зазор, мм	4,3±0,3	
Число витков обмотки на полюсе	18	
Марка провода	АМ	АДО
Размер провода, мм	3×25	
Сопротивление двух катушек, Ом	0,0064	
Масса меди (алюминия), кг	3,32	
Щетки		
Число щеток на главный и добавочный полюсы (пальцы), шт./шт.	2,2	

с коллекторным генератором

АДБ-311	АСБ-300М	ПАС-400-У1 (У3)
ГД-305	ГСО-300М	СГП-3-У1
1500	3000	1600
10,8	7,5	16
МГМ		МГМ (голый)
2,44×10,8		2,63×11,6
1,11		1,13
1—42		1—2
1		Число сторон секций в пазу — 4, витков в одной секции — 1
0,0125	0,01	0,0047
17	13,7	35
$1^{+0,1}_{-0,2}$	$1,85^{+0,05}_{-0,15}$	1,5/1,5
330/5+4		Число катушек 2+2/2, витков в одной катушке — 180/60 / 6 (4+2)
ПСД/МГМ	ПСД-АМ	ПСД/МГМ (голый)
1,88/2,44×18	1,88/4,4×18	3,53/4,7×16,8
2,54 / 0,0012+0,0010	1,9 / 0,008+0,001	0,75/0,0022
11/4,2	1,37/2,96	(всех катушек) 38,5/7,7
4,3+0,3		5
18		Число катушек — 4, витков — 8
МГМ	АМ	МГМ (голый)
2,44×18	3×25	4,7×16,8
0,008	0,005	0,0055
7,7	2,96	17,2
2,2		5/3
		Число пальцев 4/1

Технические данные	Марка бензинового агрегата	
	АСБ-300-7	АДБ-309
Марка и размер главных щеток, мм	ЭГ4 16×32	
Марка и размер добавочных щеток, мм	ЭГ8 5×20	
Число шарикоподшипников:		
со стороны двигателя	210	
со стороны коллектора	208	
Реостат регулирования тока		
Сопротивление, Ом	3,5	2,47
Наибольший ток, А	10,0	15
Материал	Константан мягкий	Х13Ю4-1,8Х
Диаметр проволоки, мм	1,3	1,8
Число витков	83 (27 + 28 + 28)	100 (50+50)
Сопротивление проволоки, Ом	0,35	0,47
Длина проволоки, м	—	10,5 + 10,5
Масса проволоки, кг	0,118	—
Масса генератора, кг	218	242
Габариты генератора, мм:		
длина	675	—
ширина	474	—
высота	625	—

Технические данные	Марка дизельного агрегата		
	АДД-303	АДД-305	АДД-3112
Тип генератора	ГСО-300-12	ГД-310	ГД-3120
Номинальная частота вращения, об/мин	1600		
Номинальная мощность генератора, кВт	10,08		
Якорь			
Марка провода	МГМ		ПММ
Размер провода, мм	2,44×10,8		2,5×9,0
Шаг по пазам	1—11		
Шаг по коллектору	1—42		
Число холостых секций	1		
Сопротивление обмотки при 20 °С, Ом	0,0125		0,0145
Масса меди (алюминия), кг	17,5		14,4

Продолжение табл. 10.4

с коллекторным генератором

АДБ-311	АСБ-300М	ПАС-400-У1 (У3)
ЭГ4 16×32		ЭГ4 20×20
ЭГ8 5×20	ЭГ14 7×20 МГС 5×6; 3×20	ЭГ8 или ЭГ14 7×20
210 208		212 212
4,5	2,44	4,97 (2,36+1,57+1,04)
15	12	21
Х13Ю4-2,8		Константан мягкий
3,0	1,2	1,5
100 (50+50)	—	279 (93+93+93)
0,205	0,42	0,266
2×10,95	—	—
—	—	1,88
208	210	730
—	—	1014
—	—	800
—	—	735

Таблица 10.5

с коллекторным генератором

АСД-300М	АСД-300Т	АДД-304	АСДП-500	АСДП-500Г
ГСО-300-12	ГД-309	ГД-307	СГМ-3-У3	ГСМ-500
1500		2000	1500	
10,08		7,5	20	33
		МГМ		
2,44×10,8			2,63×11,6	
1,11			1—13	
1,42			1—2	
1			Число секций в пазу — 4; витков в секции — 1	
0,0125		0,0109	34	
17,5	17	15	34	
			Уравнительных соединений — 10. Провод ПДБ1×5,9. Шаг 1—51. Масса меди 0,4 кг	

Технические данные	Марка дизельного агрегата		
	АДД-303	АДД-305	АДД-3112
Главные полюсы			
Воздушный зазор, мм	$1^{+0,1}_{-0,2}$		$1^{+0,4}_{-0,2}$
Число витков обмотки на полюсе	330/5+4		330/4+5
Марка провода	ПСД/АМ		ПСД/АДО
Размер провода, мм		$\frac{1,88}{4,4\times18}$	
Масса меди (алюминия), кг		11,0/2,3	
Сопротивление двух катушек, Ом	$\frac{2,54}{0,0024+0,0020}$		$\frac{2,54}{0,0020+0,0024}$
Дополнительные полюсы			
Воздушный зазор, мм	$4,3\pm0,3$		$2,3\pm0,3$
Число витков обмотки на полюсе	18		17
Марка провода	АМ		АДО
Размер провода, мм		3×25	
Сопротивление двух катушек, Ом	0,008		0,0076
Масса меди (алюминия), кг		4,0	
Щетки			
Число щеток на главные и добавочные полюсы (пальцы), шт./шт.		2/2	
Марка и размер главных щеток, мм		ЭГ4 16×32	
Марка и размер добавочных щеток, мм		ЭГ8 5×20	
Число шарикоподшипников:			
со стороны двигателя		210	
со стороны коллектора		208	
Реостат регулирования сварочного тока			
Сопротивление, Ом	3,5		4,5 (+0,28)
Наибольший ток,	12		15 (+100)
Материал	Константан мягкий		Х13Ю4-2,8Х
Диаметр проволоки, мм	1,3		3,0
Число витков	—	—	100 (50+50)
Сопротивление проволоки, Ом	—	—	0,205
Длина проволоки, м	—	—	$2\times10,95$
Масса проволоки, кг	0,115	—	—
Масса генератора, кг	265		275
Габариты генератора, мм:			
длина	—	—	—
ширина	—	—	—
высота	—	—	—

с коллекторным агрегатом

АСД-300М	АСД-300Т	АДД-304	АСДП-500	АСДП-500Г
330/4+5	$1^{+0,1}_{-0,2}$ 330/5+4		—	—
ПСД/АМ	ПСД/МГМ	ПСД/АМ	Число катушек 2+2. Обмотки параллельные. Число витков в катушке 180 и 30. Провод ПДБ ⌀ 2,83. Сопротивление всех катушек 0,99 Ом. Масса меди 21 кг	240
1,88 / 4,4×18	2,44×18	4,4×18		ПСД или ПБД ⌀ 1,68
11,0/2,3	11/4,2	8,92/1,516		16,5
2,54 / 0,0024+0,0020	2,54 / 0,0012+0,0010	2,2 / 0,00088+0,0007		6,2
	4,3±0,3		—	—
	18		Катушек 2+4	1+8
АМ	МГМ	АМ	6/3-3	МГМ
3×25	2,44×18	3×25	4,7×16,8+4,7×16,8	
0,008		0,0064	0,0022+0,0055	0,0075+ +0,0055
4,0	7,6	3,32	17,2	2,6+17,2
	2,2		4×4+1×3	4×5
	ЭГ4 16×32		ЭГ4 20×20	
	ЭГ8 5×20		ЭГ4 7×20	—
	210		212	
	208		2213	
3,5	4,5	3,5	—	3,7
12	15	12	—	9,0
Константан мягкий	СО-20Н80Т3	Константан мягкий	—	—
1,3	2,8	1,3	—	—
—	100 (50+50)	—	—	—
—	0,205	—	—	—
—	2×10,95	—	—	—
0,115	—	0,115	—	—
265		228	700	680
—	685	—	—	—
—	474	—	—	—
—	660	—	—	—

Таблица 10.6

Технические данные	Марка агрегата с вентильным генератором				
	АДБ-318	АДБ-3120	АДД-502		
Тип генератора	ГД-312	ГД-314	—		
Мощность генератора номинальная, кВт		10,08	2×10,8		
Частота вращения, об/мин		2000	1800		
Номинальный сварочный ток, А		315	2×315/500		
Номинальное рабочее напряжение, В		32,6	32,5/40		
Напряжение холостого хода, В, не более	85	95	100		
Пределы регулирования сварочного тока, А	40—350	15—350	60—300/250—550		
Продолжительность цикла сварки, мин		5	5/10		
Относительная продолжительность нагрузки, ПН, %		60	60/80		
Обмотки статора			Рабочая	Дополнительная	Вспомогательная *
Тип обмотки	Петлевая двухслойная	Петлевая однослойная	Петлевая однослойная		
Число параллельных катушечных групп на фазу **		2	2	1	
Число катушек в катушечной группе	8	4	3	1	
Число витков в катушке	4	8	9	45	40
Число витков на фазу		32	27	45	40
Шаг обмотки		3		3	
Число эффективных проводников в пазу		8	9	45	40

Технические данные	Марка агрегата с вентильным генератором				
	АДБ-318	АДБ-3120	АДД-502		
Число элементарных параллельных проводов в эффективном проводнике	11		10	2	
Число элементарных проводов в пазу	—	88	90		80
Марка и диаметр провода, мм	ПЭТВ ⌀ 1,08				
Сопротивление одной катушечной группы при 20 °С, Ом	0,037		0,038	0,275	0,245
Масса меди, кг	11,7	11,1	7,9	0,92	0,41
Изоляция	Кл. В				
Обмотка возбуждения					
Тип обмотки	Цилиндрическая				
Марка и диаметр провода, мм	ПЭТВ ⌀ 1,08		ПЭТВ ⌀ 1,81		
Число витков	500				
Сопротивление катушки при 20 °С, Ом	2,02				
Масса меди, кг	6,73				
Изоляция	Кл. В				
Трансформатор напряжения					
Число витков катушки первичной обмотки	110		—		
Число витков катушки вторичной обмотки	50	0—50—140	—		
Марка и размеры проводов, мм	ПЭТВ ⌀ 1,08	ПЭТВ ⌀ 1,06	—		
Изоляция	Кл. В				
Трансформатор тока					
Число витков катушки первичной обмотки	5		—		

Продолжение табл. 10.6

Технические данные	Марка агрегата с вентильным генератором		
	АДБ-318	АДБ-3120	АДД-502
Число витков катушки вторичной обмотки	33		—
Марка и размеры провода, мм:			
первичной катушки	МГМ 2,44×18		—
вторичной катушки	ПЭТВ ∅ 1,08	ПЭТВ ∅ 1,06	—
Изоляция		Кл. В	
Номер подшипника	309К		312
Число подшипников		2	
Резистор регулируемый, добавочный			
Сопротивление, Ом	13,1		—
Марка провода	Проволока Х20Н80-11-1Х	1,0-3а-С-Х15Н60	—
Диаметр провода, мм	1,0		—
Число витков	82		—
Длина провода, м	9,4		—
Реостат дистанционный			
Полное сопротивление (двух элементов), Ом	58		25
Марка провода	Проволока Х20Н80-11-1Х	1,0-3а-С-Х15Н60-1Х	Х20Н80-П-3,4Х
Диаметр провода, мм	1,0		1,4
Суммарная длина провода, м	42		18,8
Число резистивных элементов	2	3	2

* Данные для одного генератора.

** Катушечные группы той же фазы размещаются одна за другой по расточке статора.

сварочного агрегата характеризуется перемежающимися нагрузками.

Имеется еще одна особенность, характеризующая условия работы двигателя внутреннего сгорания в составе сварочного агрегата, — значительная доля общего времени работы агрегата приходится на холостой ход. Это определяется технологическими особенностями выполнения ручной дуговой сварки при монтажных, строительных и ремонтных работах.

Из двигателей, применяемых в агрегатах, лишь дизели 2ч8,5/11 и 4ч8,5/11 являются двигателями общепромышленного назначения, разработанными для стационарных условий работы.

Двигатель ЗМЗ-320-01 создан на базе автомобильного двигателя ЗМЗ-24 автомашины ГАЗ-24. Основные его отличия — усилена система охлаждения, для чего применен шестилопастный вентилятор прямого потока (на двигатель); изменена конструкция карбюратора; установлен регулятор частоты вращения с клиноременным приводом от коленчатого вала двигателя.

Двигатель автомобиля «Москвич» модели 408, переоборудованный для работы в качестве стационарного двигателя в силовой установке АБ8М, имеет следующие изменения: усилена система охлаждения, для чего установлен шестилопастный вентилятор обратного потока (от двигателя), заключенный в специальный кожух; применен регулятор частоты вращения, расположенный на месте снятого зарядного генератора, с клиноременным приводом от коленчатого вала; в систему смазки включен масляный радиатор с кожухом, предназначенным для направления потока охлаждающего воздуха; изменена конструкция карбюратора.

Автомобильный двигатель ЗИЛ-164 для работы в составе сварочного агрегата дооборудуется на заводе — изготовителе агрегатов. На двигатель устанавливается регулятор частоты вращения; под карбюратор помещается дополнительная дроссельная заслонка, управляемая регулятором; усиливается охлаждение двигателя путем установки двух жидкостных радиаторов; устанавливается автоматический выключатель зажигания, действующий при внезапном увеличении частоты вращения.

Тракторный дизель Д-144 для работы в составе сварочного агрегата специальных доработок не требует. В отличие от тракторных модификаций на дизель не устанавли-

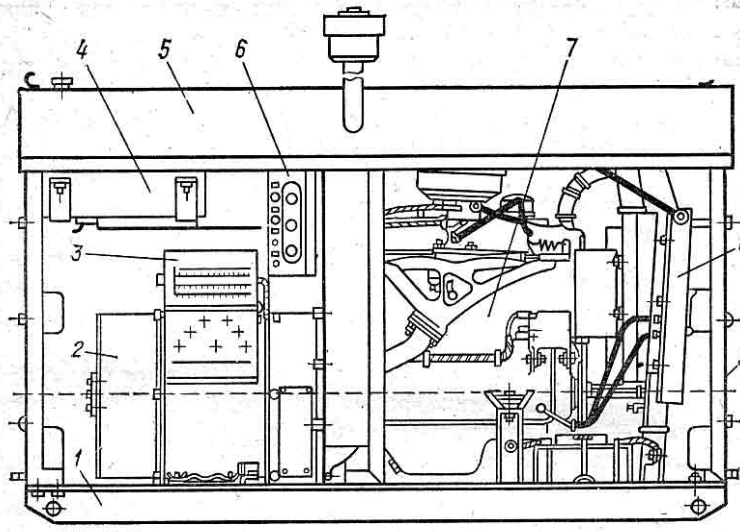


Рис. 10.17. Общий вид сварочных агрегатов АСБ-300-7, АДБ-309, АДБ-311

1 — рама; *2* — сварочный генератор; *3* — реостат регулирования сварочного тока; *4* — топливный бак; *5* — крыша капота; *6* — пульт управления; *7* — бензиновый двигатель; *8* — радиатор охлаждения; *9* — штора капота

вается гидронасос и производится стендовая регулировка топливного насоса на соответствующую мощность и частоту вращения.

Дизель ЯАЗ-М204Г является стационарной модификацией применявшегося ранее автомобильного дизеля ЯАЗМ204. Отличается увеличенным диаметром вентилятора, наличием диффузора у вентилятора, приводом вентилятора с помощью двух клиновых ремней, однорежимным регулятором частоты вращения.

Сварочные агрегаты АСБ-300-7, АДБ-309, АДБ-311 (рис. 10.17). В агрегатах генератор и бензиновый двигатель модели 320-01 соединяются в силовой блок с помощью литого фланца, конструктивно выполненного вместе с передним подшипниковым щитом генератора. Фланец жестко соединяет генератор с картером маховика двигателя. Валы двигателя и генератора соединяются полужесткой муфтой. Муфта агрегата АДБ-300-7 представляет собой установленный на шпонке на валу генератора металлический диск, в шесть круглых гнезд которого входят закрепленные на маховике двигателя пальцы с резино-

выми втулками. В агрегатах АДБ-309, АДБ-311 пальцы выполнены на полумуфте генератора и входят в гнезда резинокордового диска, закрепленного на маховике двигателя.

Силовой блок с помощью резиновых амортизаторов устанавливается четырьмя опорами (две лапы генератора и два опорных кронштейна двигателя) на раму агрегата. Рама агрегата — сварная, имеет два продольных швеллера и поперечные балки коробчатого сечения. На раму агрегата болтами крепится шесть вертикальных стоек капота. Сверху к стойкам болтами крепится крыша агрегата. У агрегата АДБ-300-7 шесть штор капота съемные. Агрегаты АДБ-309, АДБ-311 имеют двухстворчатые шторы с горизонтальным шарнирным соединением створок в средней части и шарнирным присоединением штор к крыше капота. В закрытом положении каждая штора может быть заперта специальным замком с трехгранным ключом.

Двигательная и генераторная части агрегата разделены между собой поперечной перегородкой. Перегородка обеспечивает нормальный тепловой режим работы генератора, поскольку вентилятор двигателя направляет поток горячего воздуха от радиатора на двигатель и в сторону генератора. На перегородке в генераторной части с правой стороны агрегата крепится пульт управления и контроля за работой двигателя агрегата.

Общий вид схемы электрооборудования агрегатов приведен на рис. 10.18.

В передней части агрегатов с помощью амортизаторов и горизонтальных растяжек крепится рамка, несущая водяной и масляный радиаторы двигателя и диффузор вентилятора. Под крышей капота над генератором крепится топливный бак. Горловина бака выходит на крышу капота и закрывается завинчивающейся крышкой. Крышка имеет топливомерную линейку и атмосферное отверстие. С левой стороны агрегата на раме крепятся в специальном гнезде аккумулятор и инструментальный ящик.

Сварочные генераторы ГСО-300-5 — агрегата АДБ-300-7, ГД-303 — агрегата АДБ-309, ГД-305 — агрегата АДБ-311 однотипны по конструкции (рис. 10.18) и являются однопостовыми сварочными четырехполюсными генераторами постоянного тока с последовательной размагничивающей обмоткой, с самовозбуждением. Конструкция генераторов защищенная (предохраняющая от

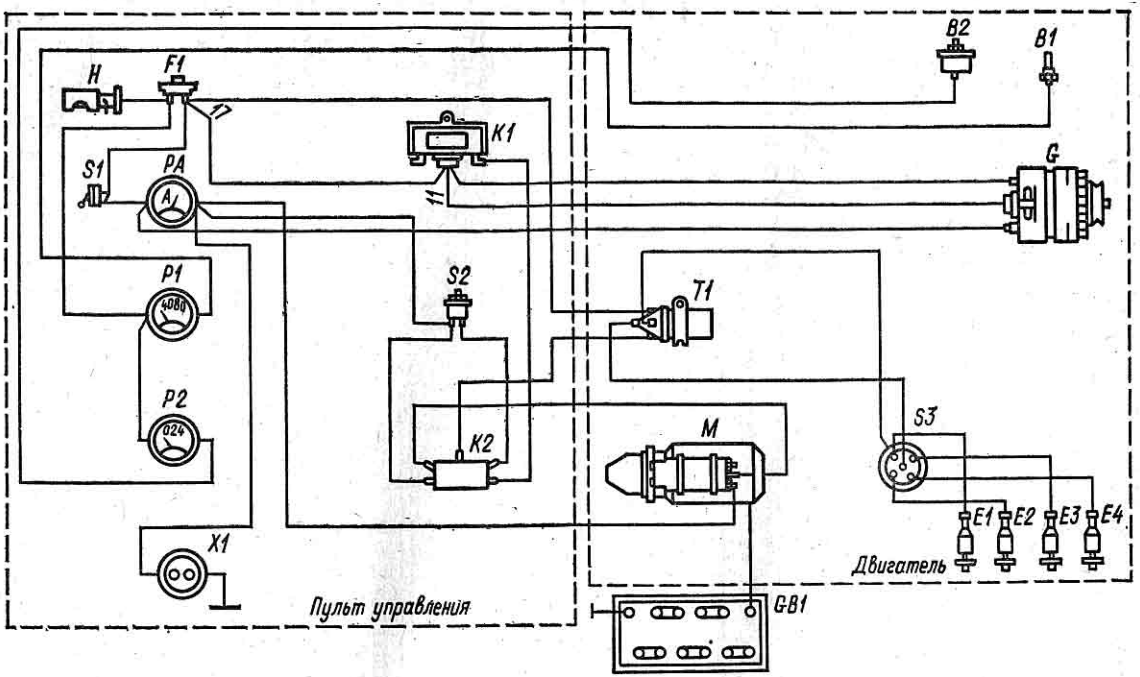


Рис. 10.18. Общий вид схемы электрооборудования сварочных агрегатов АСБ-300-7, АДБ-309, АДБ-311

PA — амперметр; *GB1* — аккумуляторная батарея; *S1* — выключатель зажигания; *S2* — включатель стартера; *G* — генератор; *B1* — датчик температуры воды; *B2* — датчик давления масла; *K1* — реле-регулятор; *K2* — реле включения стартера; *T1* — катушка зажигания; *H* — фонарь освещения пульта; *P1* — указатель температуры воды; *P2* — указатель давления масла; *F1* — предохранитель; *X1* — розетка; *S3* — распределитель; *M* — стартер; *E1—E4* — свечи

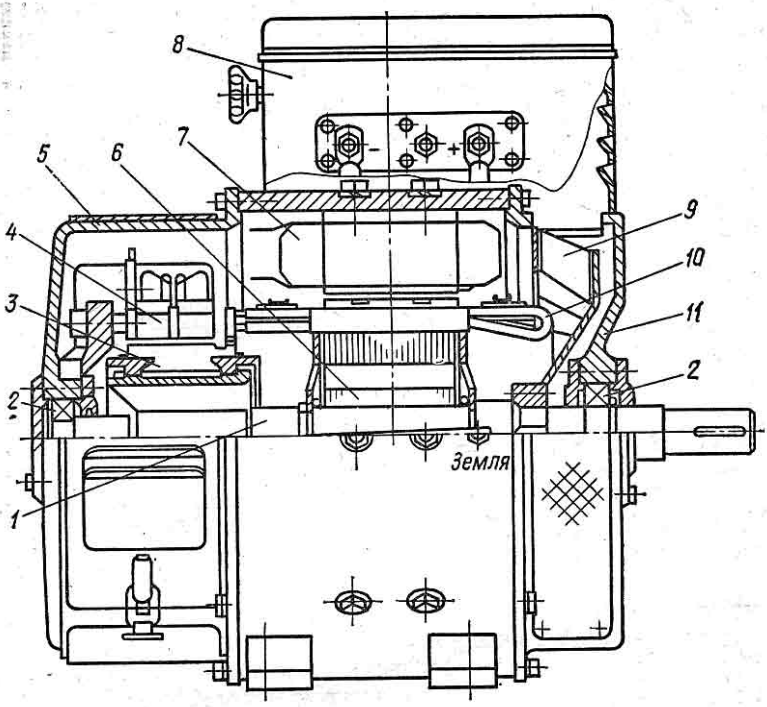


Рис. 10.19. Общий вид сварочного генератора типа ГСО-300

1 — вал якоря; *2* — подшипники; *3* — коллектор; *4* — узел токосъема; *5* — передний щит; *6* — железо якоря; *7* — полюс; *8* — кожух реостата регулирования тока; *9* — вентилятор; *10* — обмотки якоря; *11* — задний щит

непосредственного попадания внутрь посторонних предметов), с самовентиляцией (рис. 10.19). Якорь генераторов установлен на шарикоподшипниках.

Генераторы могут нормально работать только при направлении вращения, указанном стрелкой на щите генератора. Генератор имеет на основных полюсах две обмотки (рис. 10.20) — намагничивающую (шунтовую), расположенную на двух геометрически противоположных одноименных полюсах (*N*), и последовательную (размагничивающую), расположенную на двух других полюсах (*S*) так, что полюсы с намагничивающей и размагничивающей обмотками чередуются.

Падающая внешняя характеристика получается, как было показано выше (см. § 10.2), за счет размагничивающего действия последовательной обмотки: чем больше

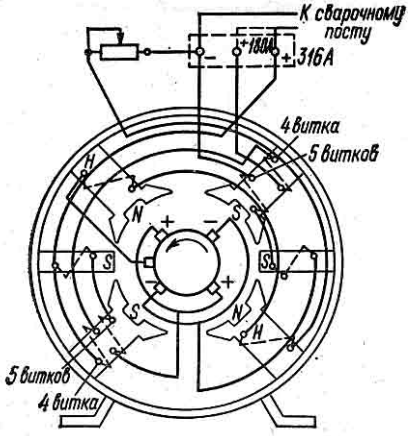


Рис. 10.20. Схема соединений генератора типа ГСО-300

ток нагрузки, тем сильнее размагничивающее действие последовательной обмотки, тем меньше магнитный поток в воздушном зазоре и якоре и, следовательно, меньше ЭДС и напряжение генератора.

На коллекторе, помимо основных щеток (комплектов щеток) «плюс» и «минус», посредине между ними установлена еще одна дополнительная, «третья», щетка (щеточный комплект), и питание намагничивающей (шунтовой) обмотки возбуждения осуществляется напряжением половины обмотки якоря—между одной основной щеткой и дополнительной, «третьей»,—той части обмотки якоря, где его реакция действует намагничивающе. ЭДС и напряжение на указанной половине обмотки якоря определяются результирующим значением половины магнитного потока основных полюсов и половины потока поперечной реакции якоря в воздушном пространстве.

С увеличением тока нагрузки магнитный поток основных полюсов вследствие размагничивающего действия последовательной обмотки уменьшается, а поток поперечной реакции якоря увеличивается. Генератор рассчитан так, что напряжение между щетками — вспомогательной и главной, от которых питается обмотка возбуждения, с изменением тока нагрузки изменяется в небольших пределах, следовательно, в небольших пределах изменяется и ток в обмотке возбуждения.

Для безыскровой работы вспомогательной щетки под серединой полюсной дуги основных полюсов сделаны вырезы.

Для обеспечения нормальной коммутации основных щеток генератор имеет два дополнительных полюса (одноименные — *S*).

Сварочный ток регулируется реостатом — регулятором тока, который смонтирован на корпусе генератора

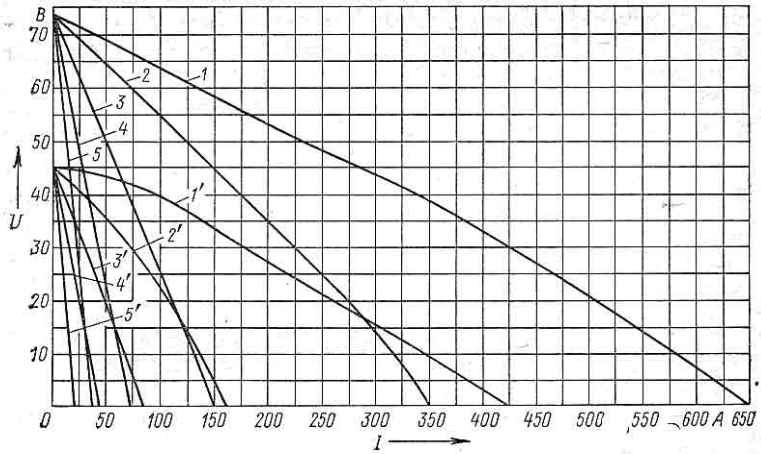


Рис. 10.21. Внешние статические характеристики агрегата АДБ-309
1, 2, 3, 4, 5 — диапазон больших токов; *1′, 2′, 3′, 4′, 5′* — диапазон малых токов

ГСО-300-5, а в генераторах ГД-303 и ГД-305 является выносным. Реостат включен в цепь намагничивающей (шунтовой) обмотки возбуждения. При увеличении тока возбуждения увеличиваются ток короткого замыкания и рабочий ток, а также напряжение холостого хода. Чтобы при регулировании сварочного тока до наименьшего значения напряжение холостого хода не было слишком малым, генератор ГСО-300-5 имеет две ступени регулирования и два диапазона сварочных токов: диапазон «малых токов», когда включается полное число витков последовательной размагничивающей обмотки, и диапазон «больших токов», когда включается лишь часть витков размагничивающей обмотки. В первом случае имеет место более сильное размагничивающее действие последовательной обмотки и внешние характеристики идут более круто, чем при включении неполного числа витков последовательной обмотки. Внешние статические характеристики ГСО-300-5 соответствуют характеристикам на рис. 10.12. Генераторы ГД-303, ГД-305 имеют расширенные пределы регулирования тока — от 15 до 350 А и пять ступеней (пять диапазонов) сварочного тока (рис. 10.21). Три дополнительных диапазона получаются за счет включения в цепь якоря соответствующих балластных сопротивлений, смонтированных на корпусе генератора.

Предшественником указанных агрегатов был агрегат АСБ-300-4. Конструкция агрегатов однотипна. Агрегат АСБ-300-4 имел частоту вращения 1500 об/мин. В нем использовался двигатель модели 320 (на базе автомобильного ГАЗ-21).

Сварочные агрегаты АСБ-300М, АБ-8АСБ-300МА. В агрегатах сварочный генератор и силовая установка АБ8М на базе бензинового двигателя «Москвич»-408 имеют фланцевое соединение. Полужесткая муфта соединения двигателя и генератора агрегата АСБ-300М конструктивно подобна муфте агрегата АСБ-300-7. В агрегате АБ-8АСБ-300МА муфта выполнена в виде двух стальных полумуфт и расположенной между ними резиновой прокладки.

При соединении выступы полумуфт входят в соответствующие пазы резиновой прокладки.

Защитный капот агрегата АСБ-300М конструктивно выполнен однотипно с капотом агрегата АСБ-300-7. Агрегат АБ-8АСБ-300МА имеет капот бескаркасной конструкции. В верхней части капота имеются шторы, открывающиеся вверх.

Силовая установка агрегата (АБ8М) представляет собой двигатель «Москвич»-408, установленный на резиновых амортизаторах на отдельной легкой раме, которая крепится к раме агрегата. На раме силовой установки смонтированы и соединены с двигателем водяной радиатор с диффузором для вентилятора двигателя; глушитель шума выхлопа, расположенный в передней части двигателя под водяным радиатором; масляный радиатор, расположенный сбоку картера двигателя и охлаждаемый воздухом от вентилятора сварочного генератора; воздушный фильтр с глушителем шума всасывания; пульт управления и контроля за работой двигателя. На двигателе силовой установки не имеется зарядного генератора. На месте зарядного генератора установлен центробежный регулятор частоты вращения. В агрегате АСБ-300М зарядка аккумуляторной батареи производится от дополнительного зарядного генератора, устанавливаемого на раме агрегата и приводимого во вращение с помощью клиноременной передачи. В агрегате АБ-8АСБ-300МА зарядка аккумуляторной батареи осуществляется с помощью специальной схемы от сварочного генератора с использованием контактных колец, подсоединенных к двум коллекторным пластинам генератора.

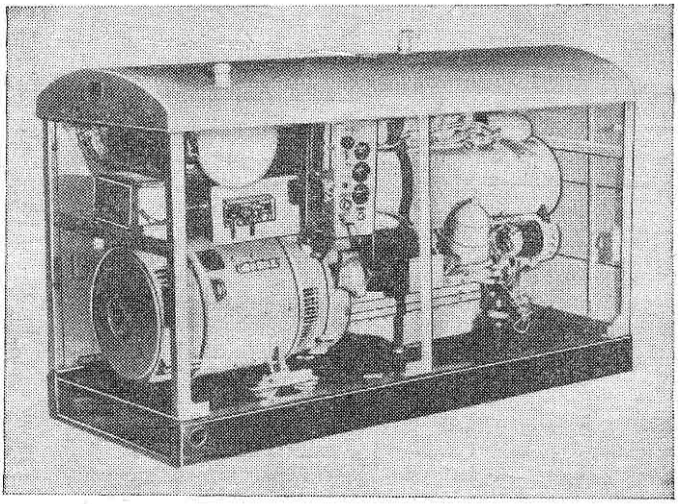


Рис. 10.22. Общий вид сварочных агрегатов АДД-303, АДД-305, АДД-3112

Сварочные генераторы ГСО-300М — агрегата АСБ-300М и ПГС-300А — агрегата АБ-8АСБ-300МА конструктивно и схемно выполнены так же, как генератор ГСО-300-5 агрегата АСБ-300-7.

Агрегат АБ-8АСБ-300МА имеет ограничитель оборотов, предназначенный для аварийного отключения двигателя при завышенных оборотах.

Сварочные агрегаты АДД-303, АДД-305, АДД-3112 (рис. 10.22). В агрегатах генератор соединяется фланцем с дизельным двигателем воздушного охлаждения модели Д144. Полужесткая муфта соединения двигателя и генератора в агрегате АДД-303 конструктивно состоит из пальцевой генераторной полумуфты и полумуфты, закрепленной на маховике дизеля. Последняя представляет собой два металлических диска, соединенных болтами. В дисках выштампованы углубления, которые образуют гнезда для размещения резиновых амортизирующих элементов. В отверстия элементов входят круглые пальцы генераторной полумуфты. Муфта агрегатов АДД-305 и АДД-3112 конструктивно выполнена так же, как у агрегата АДБ-309.

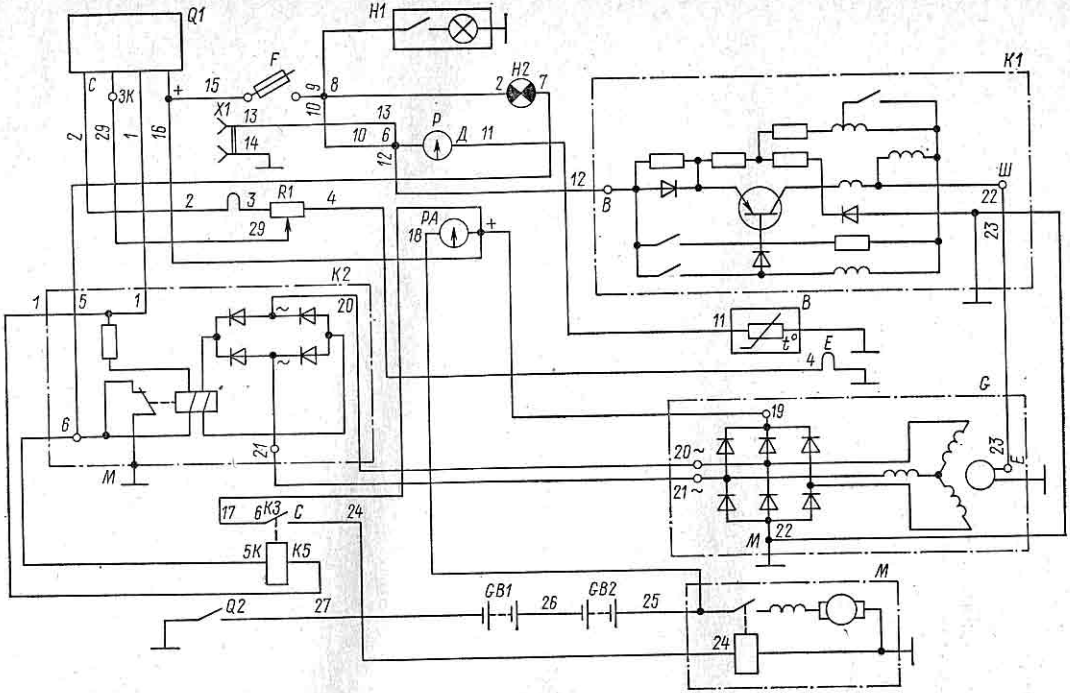


Рис. 10.23. Принципиальная схема электрооборудования сварочных агрегатов АДД-305, АДД-3112

РА — амперметр; *GB1, GB2* — аккумуляторные батареи; *Q1* — включатель; *Q2* — выключатель «массы»; *G* — генератор; *В* — датчик температуры воды; *Н1* — фонарь освещения пульта; *Н2* — лампа контрольная; *F* — предохранитель; *К1* — реле-регулятор; *К2* — реле блокировки; *К3* — реле стартера; *R1* — сопротивление добавочное; *Е* — свеча подогрева; *М* — стартер; *Р* — приемник указателя температуры масла; *Х1* — розетка; *Ш* — обмотка возбуждения зарядного генератора

Силовой дизель-генераторный блок устанавливается на раму агрегата через резиновые амортизаторы — два амортизатора под лапами дизеля и два под лапами генератора.

Конструкция рамы, капота и штор подобна конструкции этих элементов у агрегата АДБ-309. В агрегатах отсутствует разделительная перегородка между генераторным и дизельным отсеками. Топливный бак устанавливается на вертикальных стойках сбоку генератора (АДД-303) или под крышей капота (АДД-305, АДД-3112).

Сварочные генераторы агрегатов по принципу работы и конструктивному исполнению являются типичными представителями коллекторных генераторов серии ГСО-300 на частоту вращения 1500 об/мин.

Генератор ГСО-300-12 агрегата АДД-303 имеет два диапазона регулирования тока, регулирование тока недистанционное. Генераторы ГД-310 — агрегата АДД-305 и ГД-3120 — агрегата АДД-3112 имеют три диапазона регулирования тока. Диапазон малых токов получается за счет включения в цепь якоря балластного сопротивления.

Отличия имеются в схеме электрооборудования дизеля агрегатов АДД-305 и АДД-3112 (рис. 10.23) по сравнению с агрегатом АДД-303. В частности, в схему введено реле блокировки РБ-1, а также изменены типы комплектующих и приборов электросхемы.

Сварочные агрегаты АСД-300М, АСД-300Т (рис. 10.24). В сварочных агрегатах привод генератора осуществляется с помощью четырехцилиндрового дизельного двигателя жидкостного охлаждения 4ч8,5/11 общепромышленного назначения. В агрегате АСД-300М дизель с генератором соединяются в силовой блок фланцем. Муфта соединения валов генератора и дизеля по конструкции подобна муфте агрегата АДД-303.

В агрегате АСД-300Т соединение дизеля и генератора нефланцевое. Дизель и генератор жестко устанавливаются на раму агрегата, каждый на четырех опорах. При сборке агрегата требуется центровка валов генератора и двигателя.

В агрегатах водяной радиатор дизеля закреплен в специальной рамке на резиновых амортизаторах. Рамка крепится к опоре, установленной на раму агрегата. Под водяным радиатором в гнезде устанавливается аккумуляторная батарея. В передней части агрегата непосред-

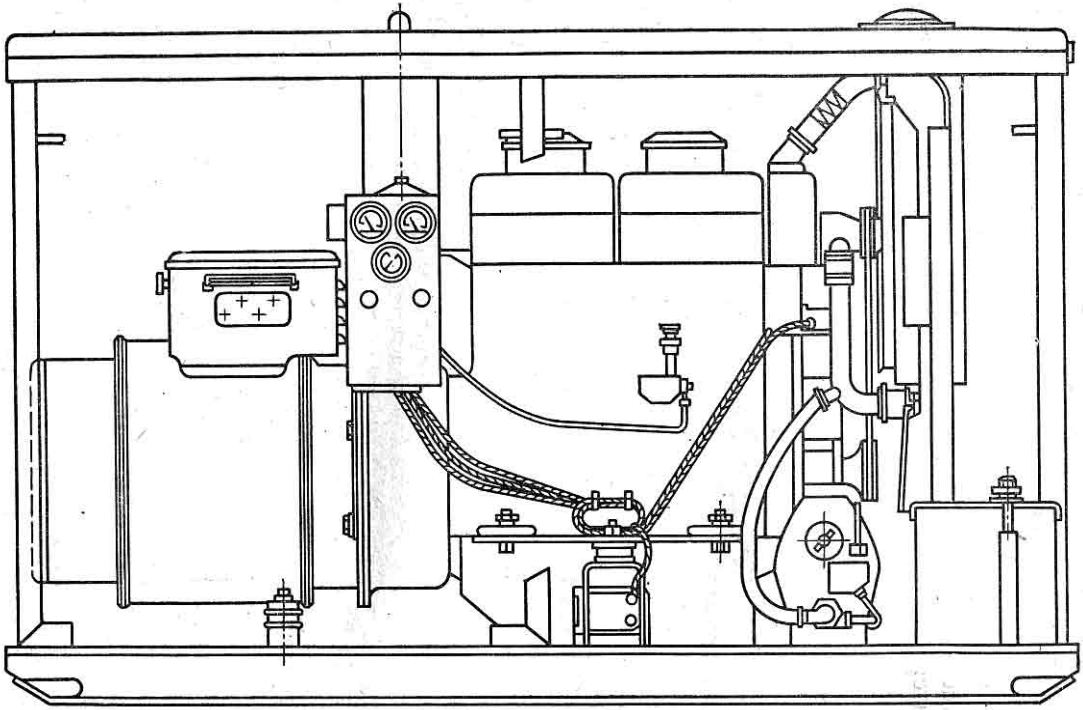


Рис. 10.24. Общий вид сварочного агрегата АСД-300М

ственно перед масляным картером дизеля размещен предпусковой подогреватель дизеля. Подогреватель соединен трубопроводами с системой охлаждения дизеля. Картер дизеля закрыт кожухом. В пространство между кожухом и картером поступают горячие газы от подогревателя. Работает подогреватель на дизельном топливе с питанием из бака агрегата.

В агрегате АСД-300М пульт управления с контрольно-измерительными приборами и электрооборудованием крепится на кронштейне к картеру маховика дизеля. Рукоятка управления топливоподачей дизеля и рукоятка декомпрессора дизеля расположены непосредственно на дизеле. В агрегате АСД-300Т пульт управления устанавливается на трубчатой вертикальной стойке с креплением ее непосредственно к раме агрегата.

Топливный бак агрегатов установлен с левой стороны генератора на вертикальных стойках. Шторы агрегата АСД-300М съемные, имеют для закрепления ключевые замки. Конструкция капота однотипна с конструкцией капота агрегата АДД-303. Шторы капота агрегата АСД-300Т — открывающиеся двухстворчатые с шарнирными соединениями створок между собой и штор с капотом.

Сварочные генераторы ГСО-300-12 — агрегата АСД-300М и ГД-309 — агрегата АСД-300Т однотипны с генератором агрегата АДД-303. Отличаются присоединительными размерами фланца у ГСО-300-12 и отсутствием фланца у ГД-309.

Сварочный агрегат АДД-304. В агрегате привод сварочного генератора ГД-307 осуществляется двухцилиндровым дизелем жидкостного охлаждения 2ч8,5/11. Дизель с генератором соединяются фланцем. Полужесткая муфта соединения валов дизеля и генератора конструктивно подобна муфте агрегата АДД-303. Дизель-генераторный блок имеет систему крепления к раме агрегата, как в агрегате АСД-300М, только опоры генератора крепятся к стойкам рамы жестко. Дизель устанавливается через резиновые амортизаторы.

Водяной радиатор дизеля крепится на специальной рамке на амортизаторах. Рамка устанавливается на кронштейн, приваренный к поперечине передних стоек капота. Под радиатором установлен подогреватель дизеля. По принципу работы и конструктивной установке подогреватель подобен подогревателю в агрегате АСД-300М.

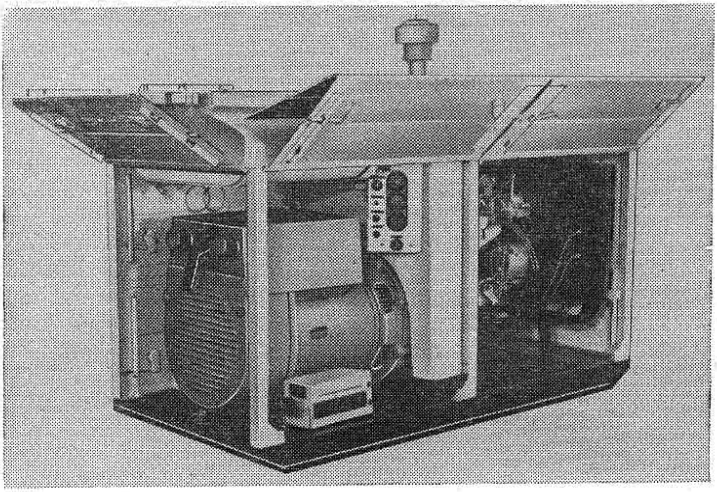


Рис. 10.25. Сварочные агрегаты АДБ-318 и АДБ-3120

Пульт управления агрегатом крепится непосредственно на дизеле. Пульт имеет пружинную амортизацию. В состав приборов контроля входит указатель частоты вращения дизеля.

Топливный бак расположен в задней части капота вертикально под крышей капота. Под баком устанавливается в гнезде аккумуляторная батарея. Во избежание попадания дизельного топлива на аккумулятор под баком имеется специальный защитный лоток. Шторы агрегата съемные, имеют для запирания ключевые замки.

Сварочный генератор ГД-307 однотипен с генератором ГСО-300-5. Отличается от него размерами присоединительного фланца.

Отличительной особенностью агрегата является возможность его работы при двух скоростных режимах. При сварке на токах до 250 А на агрегате устанавливается частота вращения 1800 об/мин, при работе на токах 250—300 А — 2200 об/мин.

Сварочные агрегаты АДБ-318 и АДБ-3120 (рис. 10.25). В агрегате вентильный сварочный генератор приводится во вращение бензиновым двигателем модели 320-01. Двигатель и сварочный генератор соединены фланцем. Двигатель-генераторный блок закреплен на раме через

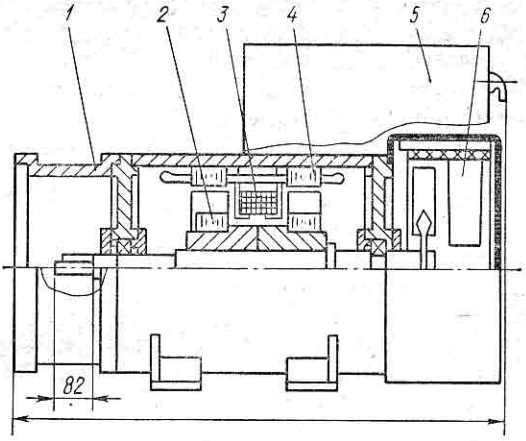


Рис. 10.26. Общий вид генератора ГД-312

1 — фланец; *2* — ротор; *3* — обмотка возбуждения; *4* — статор; *5* — аппаратура управления; *6* — выпрямительный блок

резиновые амортизаторы. Валы двигателя и генератора соединяются полужесткой муфтой.

Конструкция капота агрегатов соответствует конструкции капота агрегата АДБ-309. Пульт управления и электрическая схема двигателя соответствуют схеме агрегата АДБ-309.

Вентильные сварочные генераторы типа ГД-312 — в агрегате АДБ-318 и ГД-314 — в агрегате АДБ-3120 (рис. 10.26) конструктивно представляют собой двухпакетные индукторные генераторы повышенной частоты с выпрямительным устройством и аппаратурой управления. Конструкция генераторов защищенная, с самовентиляцией, на шарикоподшипниках. Зажимы для подключения сварочных проводов размещаются на торце коробки управления. Принцип работы вентильного генератора описан в § 10.3. Внешние вольт-амперные характеристики генераторов представлены на рис. 10.9 (для генератора ГД-312 без диапазона 1, 2).

Дистанционное регулирование сварочного тока осуществляется реостатом, который подключается к коробке управления с помощью кабеля. Дистанционный реостат закрепляется специальной защелкой на раме агрегата рядом с генератором.

Выпрямительное устройство генератора представляет собой блок кремниевых вентилей (6 шт.), собранных

в изоляционной трубе по трехфазной мостовой схеме. Между блоком вентилей и корпусом индукторного генератора установлен осевой вентилятор, который протягивает воздух через вентили и дует как вовнутрь генератора, так и на его поверхность.

Устройство управления собрано в коробке и размещено на верхней части генератора. Оно содержит трансформаторы системы возбуждения, маломощные выпрямители, элементы сопротивления, переключатель, доску зажимов для подключения сварочных проводов и гнездо для подключения дистанционного реостата управления, т. е. те узлы, которые обеспечивают самовозбуждение и нормальную работу генератора.

Генератор ГД-312 работает с самовозбуждением от силовой цепи. Начальное самовозбуждение — от остаточного магнетизма магнитной цепи машины. Далее процесс возбуждения осуществляется согласно электрической схеме (рис. 10.27) в нижеописанной последовательности.

После запуска ненагруженного генератора на зажимах обмотки статора появляется ЭДС (5—7 В). Трансформатор *TV*, питающий обмотку возбуждения через выпрямитель *VD1*, обеспечивает самовозбуждение генератора до напряжения холостого хода. С появлением нагрузки обмотку возбуждения начинает питать и трансформатор *TA* через выпрямитель *VD3*. Поскольку естественная внешняя характеристика генератора имеет крутопадающий характер, то с ростом нагрузки напряжение, подаваемое на обмотку возбуждения от трансформатора *TV*, уменьшается, а напряжение, подаваемое от трансформатора *TA*, увеличивается. Ввиду того что мгновенные значения амплитуд вторичных напряжений трансформаторов *TV* и *TA* сдвинуты по фазе, в режиме любой нагрузки оба трансформатора через выпрямители параллельно питают обмотку возбуждения до режима короткого замыкания. При коротком замыкании работает только трансформатор *TA*. Диод *VD2* служит для разрядки электромагнитной энергии, накопленной в катушках индуктивности обмотки возбуждения. Через диоды *VD1 — VD3* протекают импульсы выпрямленного тока, сдвинутые во времени, в результате чего обмотка возбуждения питается непрерывным постоянным током.

Реостатом *R2*, включенным во вторичную цепь трансформатора *TA*, регулируется чувствительность системы возбуждения к величине нагрузки, и, следовательно, им

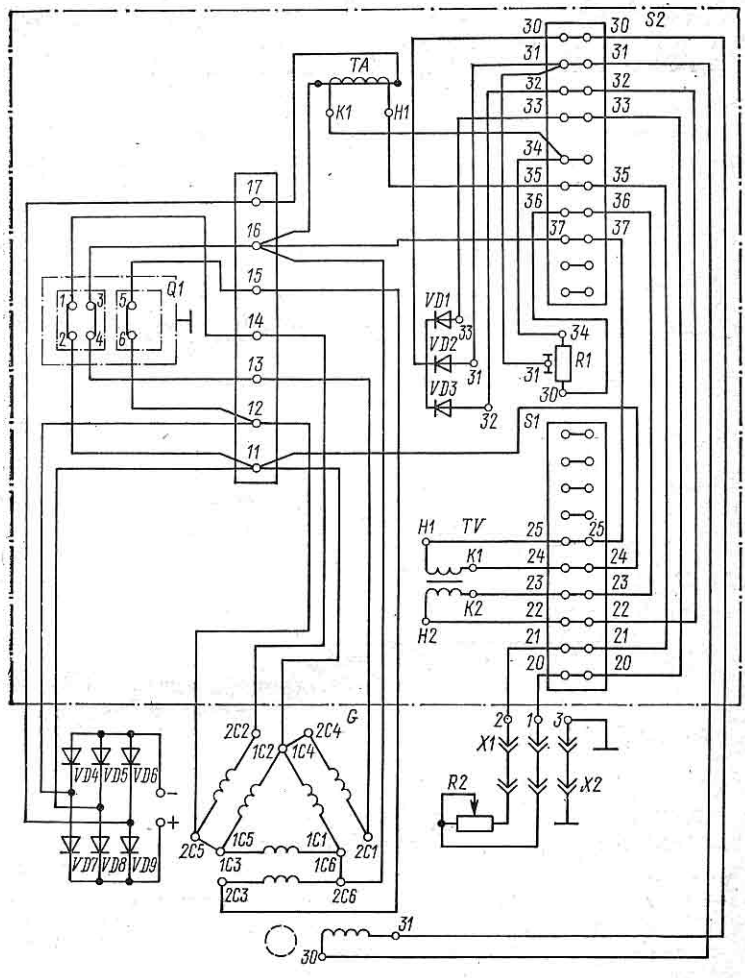


Рис. 10.27. Электрическая принципиальная схема генератора ГД-312
R1 — элемент сопротивления; *R2* — реостат; *Q1* — выключатель; *G* — генератор; *VD1—VD3* — диоды; *VD4—VD9* — вентили; *TV* — трансформатор напряжения; *TA* — трансформатор тока; *X1*, *X2* — колодки со вставками

регулируется крутизна внешних вольт-амперных характеристик.

Сварочный генератор ГД-314 по сравнению с генератором ГД-312 имеет расширенные пределы регулирования тока. Отличие имеется и в схеме управления генератора.

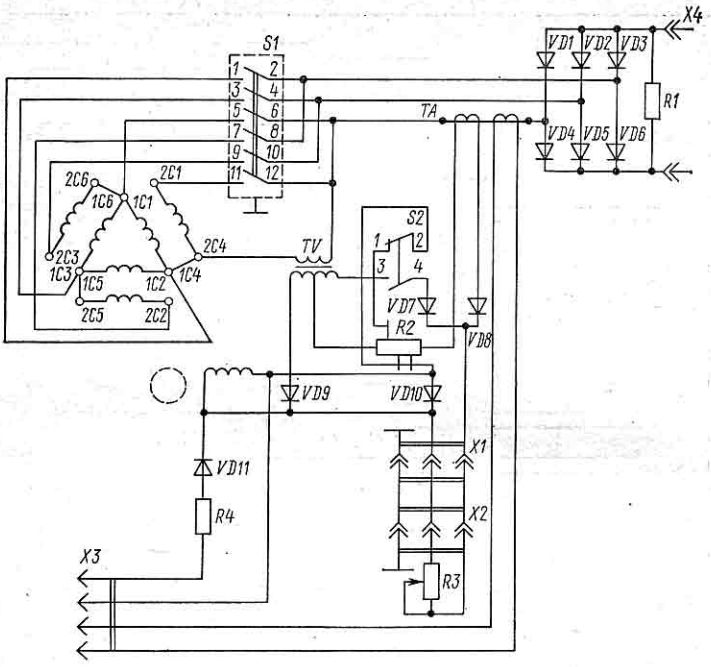


Рис. 10.28. Электрическая принципиальная схема генератора ГД-314
R1 — резистор; *R2* — элемент сопротивления; *R3* — реостат; *S1* — переключатель; *S2* — тумблер; *TA* — трансформатор тока; *TV* — трансформатор напряжения; *VD1—VD6* — вентили; *VD7—VD10* — диоды; *X1—X4* — колодки со вставками

Каждое из трех фиксированных положений переключателя обеспечивает ступенчатое регулирование сварочного тока в диапазонах 15—40 А, 40—160 А, 160—350 А. Соединение обмоток статора при каждом из трех положений переключателя показано на рис. 10.10. Плавное регулирование сварочного тока осуществляется дистанционным реостатом, включенным в цепь возбуждения. Генератор работает с самовозбуждением. Процесс возбуждения осуществляется согласно электрической схеме (рис. 10.28) в нижеописанной последовательности.

После запуска ненагруженного генератора на зажимах обмотки статора появляется ЭДС (5—7 В). Трансформатор *TV*, питающий обмотку возбуждения, в зависимости от положения тумблера *S2* через полупроводниковые диоды *VD7* и *VD9* (диапазон 15—40 А) или через полу-

проводниковый диод *VD9* (диапазоны 40—160 А и 160—350 А) обеспечивает самовозбуждение генератора до напряжения холостого хода. С появлением нагрузки обмотку возбуждения начинает питать и трансформатор *ТА* через полупроводниковый диод *VD8*. Далее процесс работы генератора такой же, как и у генератора ГД-312.

Агрегат может работать в двух скоростных режимах с целью экономии топлива. При сварке в течение длительного времени на токах в пределах 40—315 А, т. е. когда длительное время нет необходимости получения верхнего и нижнего пределов сварочного тока, при помощи регулировки винта регулятора устанавливается частота вращения двигателя 1800 об/мин.

Ниже рассматриваются специализированные источники питания сварочной дуги.

Агрегаты ПАС-400-У1 и ПАС-400-У3. Агрегаты предназначены для ручной дуговой сварки и резки токами 120—600 А на воздухе и под водой. Агрегаты ПАС-400-У1 и ПАС-400-У3 одинаковы по конструкции и различаются только комплектом поставки и длительностью предварительной обкатки на заводе-изготовителе. Агрегат ПАС-400-У1 дополнительно снабжается автоматом АС11-55, снижающим напряжение на зажимах сварочной цепи в период холостого хода генератора до значения, безопасного при подводной сварке.

В агрегатах бензиновый шестицилиндровый двигатель жидкостного охлаждения ЗИЛ-164 с помощью эластичной муфты (без фланцев) соединяется с генератором постоянного тока СГП-3-У1. Двигатель с генератором жестко устанавливаются на металлическую раму. Рама имеет металлические ролики для перемещения агрегата по ровной поверхности. Капот агрегата имеет шесть вертикальных стоек, закрепленных на раме агрегата. Сверху к стойкам крепится полукруглая крыша. Двустворчатые боковые и торцевые шторы агрегата шарнирно открываются вверх с закреплением в рабочем положении за петли на крыше капота.

В системе охлаждения двигателя применены два параллельно соединенных радиатора, закрепленных на раме агрегата.

В двигательном отсеке к крыше агрегата крепится щиток приборов с расположенными на нем контрольно-измерительными приборами, органами управления и элементами электросхемы двигателя. В генераторном

отсеке к крышке капота крепятся топливный бак и реостат регулирования сварочного тока генератора.

Сварочный генератор СГП-3-У1 по принципу работы относится к типу генераторов ГСО-300. Генератор имеет четыре основных и четыре дополнительных полюса. Возбуждение генератора осуществляется двумя обмотками возбуждения — параллельной и последовательной.

Параллельная обмотка возбуждения размещена на всех четырех основных полюсах и питается от одной из главных рабочих щеток и одной специальной дополнительной, находящейся посредине между соседними главными щетками. В цепь этой обмотки введен реостат. При таком подключении обмотки возбуждения напряжение, питающее параллельную обмотку возбуждения, мало изменяется при изменениях нагрузки в пределах от холостого хода до короткого замыкания (при неизменном положении реостата).

Последовательная обмотка возбуждения включена в цепь якоря и питается током нагрузки. Эта обмотка размещена лишь на двух основных полюсах. Таким образом, на двух основных полюсах размещена лишь параллельная обмотка возбуждения (по 180 витков на каждом полюсе), а на других двух основных полюсах — и параллельная (по 60 витков на каждом полюсе), и последовательная.

Применение последовательной обмотки возбуждения обеспечивает создание падающей внешней характеристики для получения нужных сварочных свойств. Для этого концы обмотки возбуждения включаются в цепь якоря таким образом, что создаваемый ею при нагрузке магнитный поток направлен встречно к потоку, создаваемому параллельной обмоткой возбуждения.

Генератор имеет защиту от помех радиоприему, для чего применены фильтры из конденсаторов; кроме того, для этой же цели последовательная обмотка возбуждения присоединяется к щеткам одной полярности, а обмотка дополнительных полюсов — к щеткам другой полярности.

Сварочный генератор спроектирован таким образом, что при сварочных токах 250 А и выше генератор имеет напряжение холостого хода не ниже 85 В. Для получения удовлетворительных сварочных свойств при всех сварочных токах последовательная обмотка возбуждения секционирована и включается в схему по четыре витка на каждом полюсе при токе 350—600 А и по шесть витков

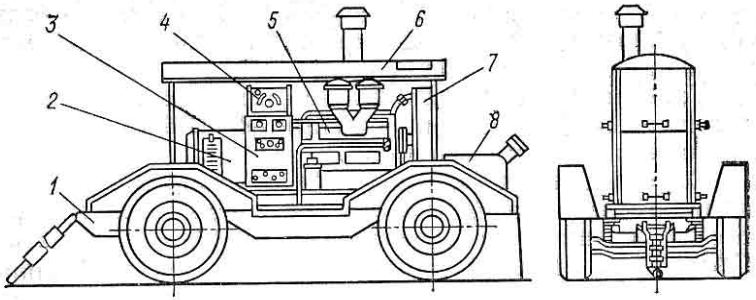


Рис. 10.29. Общий вид сварочного агрегата АСДП-500

1 — прицеп; *2* — сварочный генератор; *3* — пульт управления; *4* — реостат регулирования сварочного тока; *5* — дизель; *6* — крыша капота; *7* — радиатор охлаждения; *8* — топливный бак

на каждом полюсе при токе ниже 400 А. Для этого на доске зажимов имеются два зажима со знаками + и — и между ними еще один дополнительный зажим для присоединения токоведущего провода. Переключение производится специальной планкой, имеющей вырезы. Это позволяет производить переключение без пересоединения токоведущего провода.

Исполнение генератора — защищенное, с самовентиляцией. Для защиты от брызг воды крышки смотровых отверстий генератора снабжены резиновыми прокладками и винтовыми зажимами.

Сварочные агрегаты АСД-3-1, АСДП-500 (рис. 10.29). Агрегаты предназначены для питания постоянным током одного сварочного поста при ручной дуговой или механизированной сварке и резке токами 120—500 А. Агрегаты АСД-3-1 и АСДП-500 имеют одинаковую конструкцию агрегатной части. Отличаются тем, что АСД-3-1 имеет рамное исполнение, а АСДП-500 — исполнение на автомобильном двухосном низкорамном прицепе.

В агрегатах сварочный генератор постоянного тока типа СГП-3-У3 приводится во вращение дизельным двухтактным, четырехцилиндровым двигателем жидкостного охлаждения типа ЯАЗ-М204Г. Двигатель с генератором соединены между собой эластичной муфтой и установлены жестко на раму агрегата. Агрегат защищен капотом, имеющим вертикальные стойки, крышу, боковые и торцевые двухстворчатые шторы.

Вся аппаратура управления и контрольные приборы двигателя, а также контрольные приборы генератора

и доска зажимов для подсоединения сварочных проводов смонтированы на щите управления, укрепленном на раме агрегата сбоку генератора.

Топливный бак агрегата АСД-3-1 укреплен под крышей агрегата над генератором, в агрегате АСДП-500 — на раме прицепа в передней его части.

Сварочный генератор СГП-3-У3 по конструкции, принципу работы и способу формирования падающих характеристик одинаков с генератором СГП-3-У1 агрегатов ПАС-400-У1 (У3). Отдельные различия имеются в обмоточных данных и конструктивном исполнении некоторых элементов.

Сварочный агрегат АСДП-500Г. Агрегат предназначен для питания постоянным током двух сварочных постов при ручной дуговой сварке и резке токами до 600 А. Агрегат имеет одинаковую с агрегатом АСДП-500 конструкцию силового привода, капота и прицепа. Отличается типом сварочного генератора.

Генератор ГСМ-500 представляет собой четырехполюсный сварочный генератор постоянного тока. Возбуждение смешанное. Кроме параллельной обмотки возбуждения, на полюсах имеется последовательная обмотка, обеспечивающая неизменное напряжение генератора 55 В с точностью ±5 % независимо от изменения нагрузки. Безыскровая работа щеток обеспечивается добавочными полюсами.

Напряжение генератора регулируется реостатом РР-4/9 в цепи параллельной обмотки возбуждения, обеспечивающим при номинальной частоте вращения установку номинального напряжения генератора с точностью ±3 %.

Элементы сопротивления реостата изготовлены из константанового провода, намотанного на фарфоровые цилиндры с отводами к 30 контактам коммутатора. Полное сопротивление реостата 3,7 Ом, наибольший ток 9 А.

Сварочный ток обоих постов регулируется при помощи балластных реостатов РБ-301, включаемых последовательно с дугой для получения необходимой для питания сварочной дуги падающей внешней характеристики при неизменном напряжении генератора. Балластный реостат дает возможность ступенчато регулировать сварочный ток в пределах 100—300 А.

Сварочные агрегаты АДД-501 и АДД-502 (рис. 10.30). Агрегаты предназначены для ручной дуговой сварки и

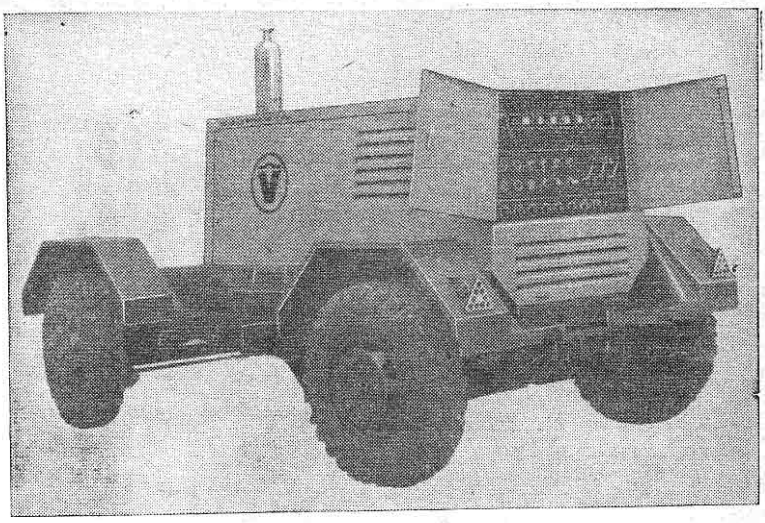


Рис. 10.30. Сварочный агрегат АДД-502

резки металлов постоянным током на двух постах токами до 315 А, а также для однопостовой механизированной сварки под слоем флюса или ручной электродуговой сварки и резки металлов постоянным током до 500 А преимущественно при строительстве магистральных трубопроводов.

Агрегат типа АДД-502 отличается от агрегата АДД-501 наличием двухосного низкорамного автомобильного прицепа типа 2-ПН-4 (модель 810А).

В агрегатах дизельный двигатель воздушного охлаждения марки Д144-68 (с пусковым двигателем ПД-8М) и двухпостовой вентильный сварочный генератор при помощи фланца образуют единый силовой блок, закрепленный на сварной раме с помощью резиновых амортизаторов. Валы дизеля и генератора соединяются между собой посредством полужесткой муфты.

Капот агрегатов выполнен из листовой стали. Некоторые элементы капота используются как конструктивные элементы агрегата. Три поперечные стенки капота сверху скреплены с крышей, а снизу — с рамой агрегата. Средняя стенка делит агрегат на два отсека — генераторный и двигательный. Генераторный отсек не имеет открывающихся штор. Вентиляция генераторного отсека осу-

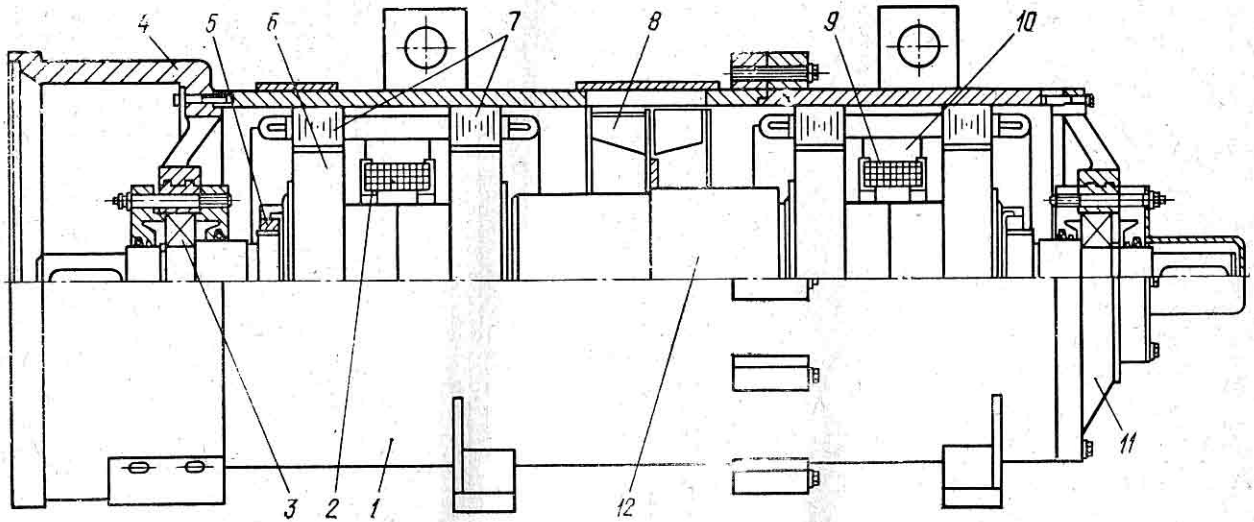


Рис. 10.31. Общий вид генератора сварочных агрегатов АДД-501, АДД-502

1 — станина; *2* — катушка возбуждения; *3* — подшипник; *4* — фланец; *5* — гайка специальная; *6* — пакет ротора; *7* — пакет статора; *8* — вентилятор; *9* — катушка возбуждения; *10* — немагнитные пальцы; *11* — подшипниковый щит; *12* — немагнитная втулка

ществляется через систему жалюзи, расположенных на его обшивке. Двигательный отсек имеет две открывающиеся шторы с фиксируемыми упорами.

Общее управление агрегатом и контроль за его работой осуществляются с пульта управления, размещенного на передней стенке агрегата.

Топливный бак закреплен в генераторном отсеке на жесткой раме через амортизаторы. Бак бензиновой смеси для питания пускового двигателя расположен под крышей в двигательном отсеке и укреплен на кронштейне.

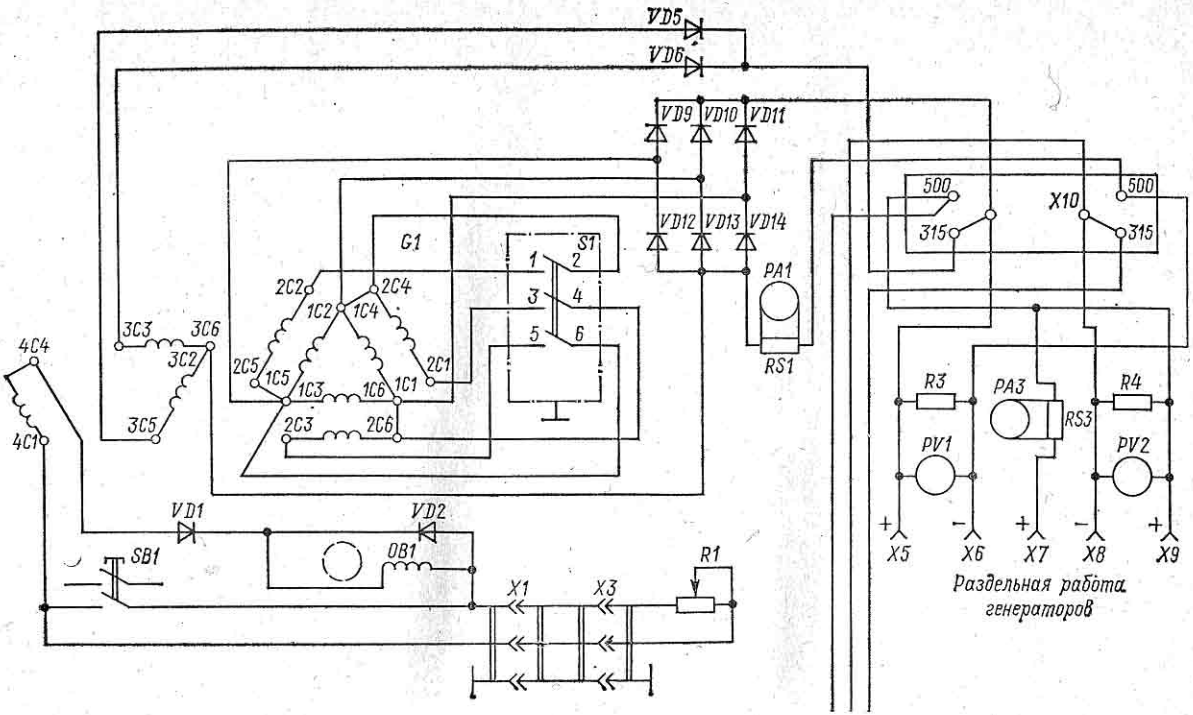
Принципиальная схема электрооборудования агрегата однотипна со схемой агрегата АДД-3112 (см. рис. 10.23). Отличие схемы лишь в том, что пусковой двигатель дизеля запускается электростартером от одной аккумуляторной батареи типа 6СТ-60ЭМ и имеются два фонаря освещения пульта управления и две розетки.

Вентильный сварочный генератор (рис. 10.31) состоит из двух самостоятельных однопостовых двухпакетных индукторных генераторов трехфазного тока, смонтированных в одном корпусе на одном валу, и вентильных блоков. Корпус разборный и состоит из двух половин. Вал состоит из двух половин, соединенных неразъемной втулкой из немагнитной стали. Наличие немагнитной втулки обеспечивает разделение магнитных цепей обоих генераторов с целью исключения взаимного влияния постов при двухпостовой сварке. Для этой же цели служат немагнитные втулки, в которых запрессовываются шарикоподшипники.

На статоре каждого индукторного генератора расположены трехфазная рабочая, дополнительная и вспомогательная обмотки. В остальном каждый генератор конструктивно выполнен как генератор ГД-312 агрегата АДБ-318. Вентильный блок генераторов смонтирован на съемном шасси и состоит из силовых необдуваемых циклоустойчивых вентилей, соединенных по трехфазной мостовой схеме (рис. 10.32), а также вентилей цепей возбуждения и дополнительных обмоток. Регулирование сварочного тока осуществляется дистанционными реостатами.

Принцип работы и формирование падающих внешних характеристик такие же, как у генератора ГД-312 агрегата АДБ-318.

Генератор работает с самовозбуждением от вспомогательной обмотки статора. Начальное напряжение возбуждения возникает от остаточного магнетизма магнитной


VD5
VD6
VD9
VD10
VD11
VD12
VD13
VD14
G1
S1
1
2
3
4
5
6
2C2
2C4
1C2
1C4
2C5
1C5
1C3
1C6
1C1
2C1
2C3
2C6
3C3
3C6
3C2
3C5
4C4
4C1
PA1
RS1
500
315
X10
500
315
R3
PA3
RS3
R4
PV1
PV2
+
−
+
−
+
X5
X6
X7
X8
X9
Раздельная работа генераторов
VD1
VD2
SB1
OB1
R1
X1
X3

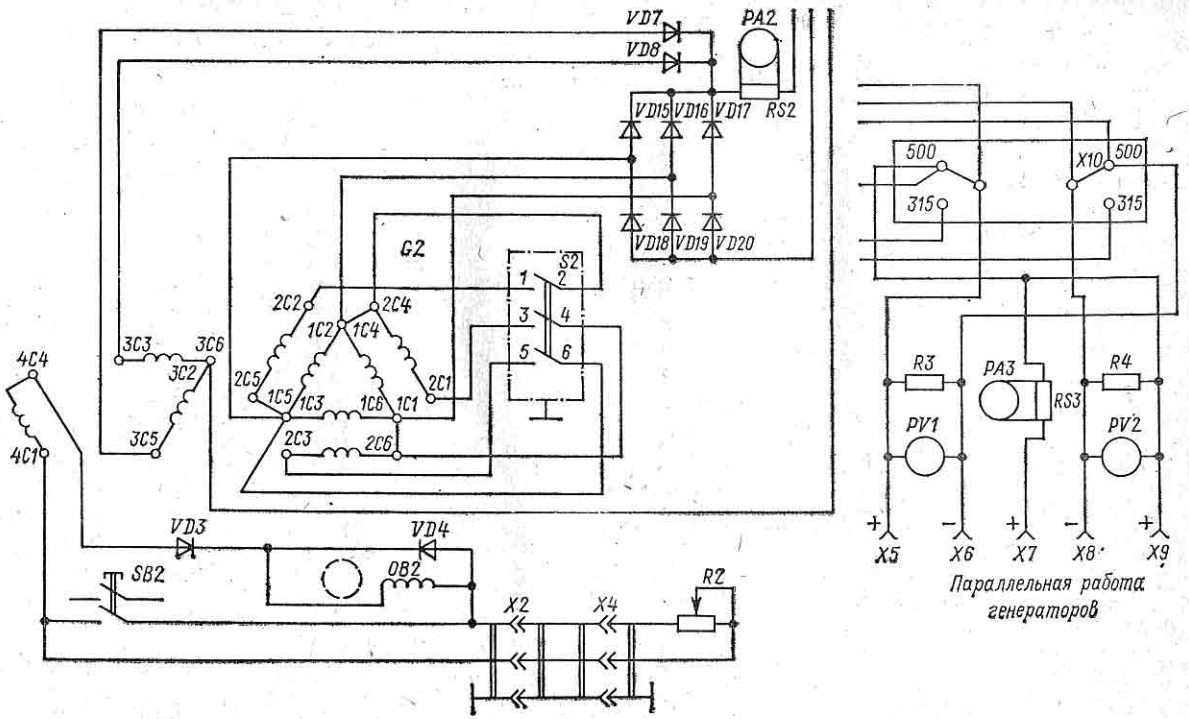


Рис. 10.32. Электрическая принципиальная схема генератора агрегатов АДД-501, АДД-502

R1, R2 — дистанционные реостаты; *R3, R4* — резисторы; *PA1, PA2, PA3* — амперметры; *PV1, PV2* — вольтметры; *S1, S2* — переключатели; *G1, G2* — генераторы; *VD1—VD4* — диоды полупроводниковые; *VD5—VD20* — вентили; *SB1, SB2* — кнопочные выключатели; *RS1, RS2, RS3* — шунты; *OB1, OB2* — обмотки возбуждения; *X1—X4* — штепсельные разъемы; *X5—X9* — гнезда панельные; *X10* — зажим контактный

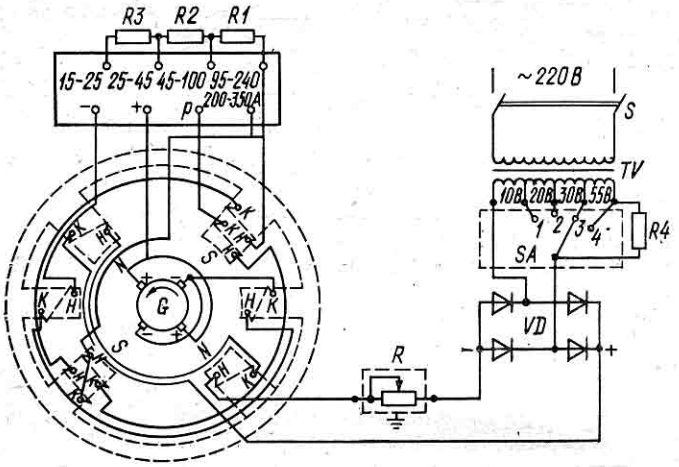


Рис. 10.33. Электрическая принципиальная схема генератора ГД-304
R1, R2, R3 — балластные сопротивления; *G* — генератор сварочный; *R* — реостат возбуждения (выносной); *VD* — выпрямительный мост; *R4* — резистор; *SA* — переключатель универсальный; *TV* — трансформатор понижающий; *S* — пакетный переключатель

цепи. Выпрямленное вентилем переменное напряжение вспомогательной обмотки подается на катушку возбуждения. Параллельно катушке возбуждения подключен диод, служащий для разрядки электромагнитной энергии, накопленной в катушках индуктивности обмотки возбуждения.

Для облегчения условий первоначального самовозбуждения имеется кнопка, при нажатии которой дистанционный реостат замыкается, тем самым значительно уменьшается сопротивление цепи возбуждения.

Дополнительная обмотка служит для повышения напряжения холостого хода и соответственно для улучшения зажигания дуги и стабильности ее горения при сварке. Дополнительная обмотка подключена через вентили к выводным зажимам генератора.

Сварочный генератор ГД-304. Генераторы ГД-304 предназначены для однопостовой ручной дуговой сварки металлов постоянным током на крутопадающих внешних характеристиках, а также для полуавтоматической сварки алюминия и алюминиевых сплавов в среде аргона на жестких внешних характеристиках.

Генераторы устанавливаются в кузове автомастерских.

Таблица 10.7

Технические данные	Внешняя характеристика	
	крутопадающая	жесткая
Номинальный сварочный ток, А	315	300
Рабочее напряжение при номинальном сварочном токе, В	32,6	30
Пределы регулирования сварочного тока, А	15—350	80—300
Продолжительность цикла сварки, мин	5	10
Относительная продолжительность нагрузки, ПН, %	60	
Пределы регулирования напряжения на зажимах генератора при холостом ходе, В	—	16—45
Напряжение холостого хода генератора, отрегулированного на номинальный режим, В	75—80	—
Номинальная частота вращения, об/мин	2000	
Число щеток на палец, шт.	2	
Марка и размер щеток, мм	ЭГ-4; 16×32×40	
Число подшипников:		
со стороны привода	210	
со стороны коллектора	208	
Масса генератора, кг	260	
Габариты генератора, мм	676×622×698	

Примечание. Сварка на токах 315—350 А разрешается при режиме работы ПН = 40 %.

Основные технические характеристики генератора представлены в табл. 10.7.

Сварочный генератор ГД-304 — однопостовой, четырехполюсный, постоянного тока, с последовательной обмоткой, с посторонним возбуждением от источника переменного тока напряжением 220 В — состоит из следующих основных частей: якоря, индуктора, подшипниковых щитов и токосъемного механизма. На корпусе генератора смонтированы балластные сопротивления и устройство управления, в котором размещены трансформатор, выпрямительный мост и переключатели для подключения и регулирования напряжения возбуждения.

Генератор приводится во вращение двигателем автомастерской через вал отбора мощности и редуктор.

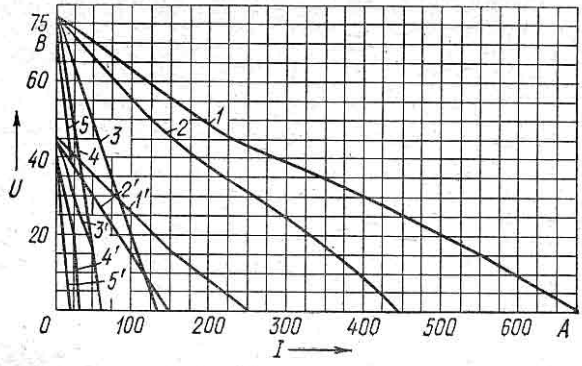


Рис. 10.34. Внешние крутопадающие характеристики генератора ГД-304

1, 2, 3, 4, 5 — диапазон больших токов; *1', 2', 3', 4', 5'* — диапазон малых токов

Генератор имеет две обмотки на основных полюсах — обмотку независимого возбуждения, расположенную на двух геометрически противоположных одноименных полюсах (*N*), и последовательную, расположенную на двух других полюсах (*S*) так, что полюсы с обмоткой независимого возбуждения и последовательной обмоткой чередуются (рис. 10.33).

Генератор ГД-304 имеет семейство крутопадающих внешних характеристик, обеспечивающих хорошее зажигание и горение сварочной дуги при ручной дуговой сварке, а также семейство жестких внешних характеристик, обеспечивающих полуавтоматическую сварку алюминия и алюминиевых сплавов (рис. 10.34, 10.35).

Крутопадающие внешние характеристики получаются при включении последовательной обмотки таким образом, что магнитный поток, создаваемый ею, направлен против потока, создаваемого обмоткой независимого возбуждения. При этом, чем больше ток нагрузки, тем сильнее размагничивающее действие последовательной обмотки, тем меньше поток в воздушном зазоре и якоре, и, следовательно, меньше ЭДС и напряжение генератора.

Жесткие внешние характеристики генератора получаются при включении последовательной обмотки таким образом, что магнитный поток, создаваемый этой обмоткой, действует согласно с потоком, создаваемым обмоткой независимого возбуждения. При этом с ростом тока на-

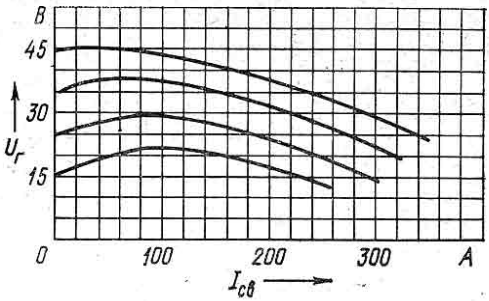


Рис. 10.35. Внешние жесткие характеристики генератора ГД-304

грузки усиливается подмагничивающее действие последовательной обмотки и компенсируется падение напряжения генератора в активном сопротивлении обмотки якоря и от поперечной реакции якоря.

Регулирование сварочного тока производится дистанционным реостатом. Реостат включен последовательно в цепь обмотки независимого возбуждения. Сопротивление реостата 4,5 Ом, наибольший ток 15 А.

Чтобы при регулировании сварочного тока до наименьшего значения напряжение холостого хода не было слишком малым, генератор имеет пять ступеней регулирования и пять диапазонов сварочных токов: диапазон 200—350 А, когда включается часть витков последовательной размагничивающей обмотки; диапазон 95—240 А, когда включается полное число витков размагничивающей обмотки. Во втором случае размагничивающее действие последовательной обмотки более сильное, внешние характеристики идут более круто, чем при включении неполного числа витков последовательной обмотки. Диапазоны 45—100 А, 25—45 А и 15—25 А получаются за счет включения в цепь якоря соответствующих балластных сопротивлений, смонтированных на корпусе генератора.

При переключении на жесткие внешние характеристики пределы регулирования напряжения на зажимах генератора при холостом ходе составляют 16—45 В.

Сварочный ток генератора при сварке устанавливается сварщиком в зависимости от скорости подачи электродной проволоки. Регулирование сварочного напряжения производится дистанционным реостатом. Обмотка независимого возбуждения генератора должна питаться от генератора переменного тока напряжением 220 В, уста-

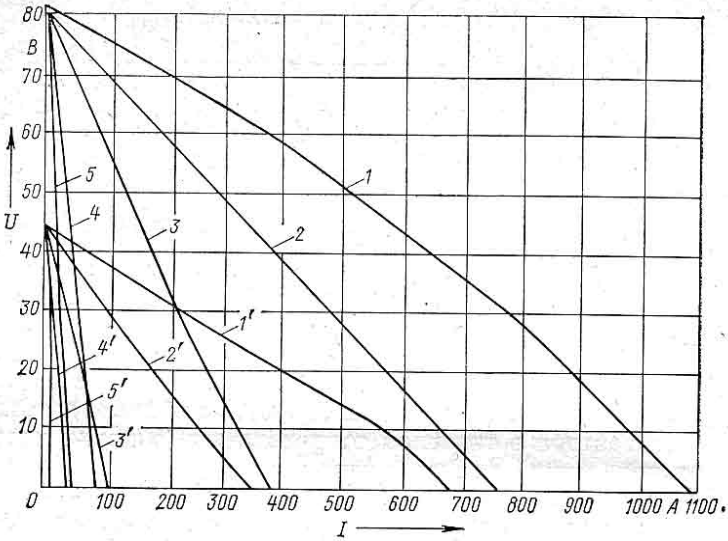


Рис. 10.36. Внешние крутопадающие характеристики генератора ГД-502

1, 2, 3, 4, 5 — диапазон больших токов; *1′, 2′, 3′, 4′, 5′* — диапазон малых токов

новленного в автомастерских, через понижающий трансформатор и выпрямительный мост (4 диода типа В2-10-2,5-У2), смонтированные на корпусе генератора. В первичной цепи понижающего трансформатора установлены переключатель диапазонов напряжения генератора и выключатель питания цепи возбуждения.

Сварочный генератор типа ГД-502. Генератор сварочный, передвижной типа ГД-502-У2 является однопостовым универсальным генератором постоянного тока, предназначенным для ручной дуговой сварки, резки и наплавки, а также полуавтоматической и автоматической сварки и наплавки под слоем флюса на крутопадающих характеристиках (рис. 10.36), для полуавтоматической и автоматической сварки и наплавки в среде защитных газов на жестких внешних характеристиках (рис. 10.37).

Генератор предназначен для работы на открытом воздухе на высоте над уровнем моря не более 1000 м при температуре окружающего воздуха —40 ... +40 °С и относительной влажности до 90 % при температуре +20 °С.

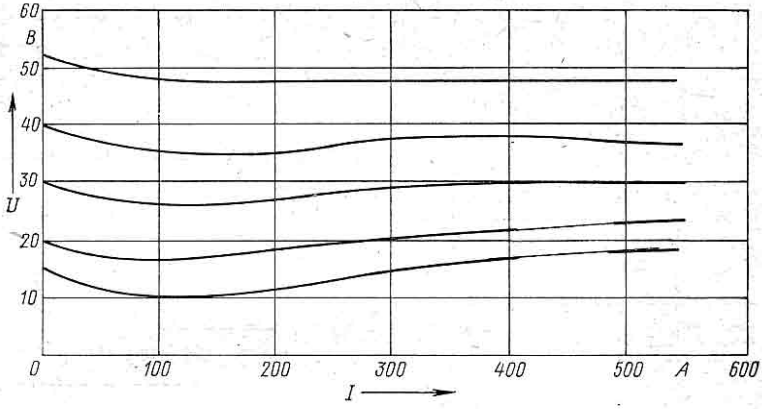


Рис. 10.37. Внешние жесткие характеристики генератора ГД-502

Основные технические характеристики генератора представлены в табл. 10.8.

Генератор конструктивно представляет собой четырехполюсную машину постоянного тока защищенного исполнения с самовентиляцией, на шарикоподшипниках, с двумя концами приводного вала. По требованию заказчика генератор может изготовляться с одним концом приводного вала.

Таблица 10.8

Технические данные	Характеристика	
	крутопадающая	жесткая
Номинальный сварочный ток, А	500	
Номинальное рабочее напряжение, В	40	
Режим работы, ПР, %	60	
Длительность цикла, мин	10	
Напряжение холостого хода, В	90	—
Пределы регулирования сварочного тока, А	15—500	—
Пределы регулирования напряжения, В	—	15—50
КПД, %, не менее	62	—
Номинальная частота вращения, об/мин	3000	
Масса, кг	400	
Габаритные размеры, мм	350×500×750	

Генератор приводится во вращение асинхронным электродвигателем или двигателем автомобиля через вал отбора мощности и редуктор. Соединение генератора с приводом осуществляется посредством полуэластичной муфты или ременной передачи.

На двух геометрически противоположных одноименных основных полюсах генератора размещена обмотка независимого возбуждения, на двух других основных полюсах — последовательная (размагничивающая) обмотка. Обмотка независимого возбуждения генератора питается от источника переменного тока напряжением 220 В $\pm$ 3 %, частотой 50 Гц через трансформатор и вентильный мост.

В первичной цепи трансформатора установлен выключатель питания цепи возбуждения и во вторичной цепи — переключатель вида сварки (жесткие, падающие характеристики).

Крутопадающие внешние характеристики получаются при включении последовательной обмотки таким образом, что магнитный поток, создаваемый ею, направлен против потока, создаваемого обмоткой независимого возбуждения. При этом, чем больше ток нагрузки, тем сильнее размагничивающее действие последовательной обмотки, тем меньше поток в воздушном зазоре и якоре и, следовательно, меньше ЭДС и напряжение генератора.

При отключенной последовательной размагничивающей обмотке генератор имеет жесткие внешние характеристики. При крутопадающих внешних характеристиках генератор имеет пределы регулирования сварочного тока 15—500 А.

Регулирование сварочного тока производится дистанционным реостатом. Этот реостат последовательно включен в цепь обмотки независимого возбуждения. При увеличении тока возбуждения напряжение холостого хода, рабочий ток и ток короткого замыкания увеличиваются. Чтобы при регулировании сварочного тока до наименьшего значения напряжение холостого хода не было слишком малым, генератор имеет пять ступеней регулирования и пять диапазонов сварочных токов: диапазон 225—500 А — при включении четырех витков последовательной обмотки, диапазон 125—400 А — при включении десяти витков последовательной обмотки, диапазон 60—200 А — при включении всех витков последовательной обмотки; диапазоны 25—65 А и 15—30 А получаются за счет вклю-

чения в цепь якоря балластных сопротивлений, смонтированных на корпусе генератора.

При жестких внешних характеристиках пределы регулирования напряжения на зажимах генератора при холостом ходе 15—50 В.

Имеются два диапазона регулирования сварочного напряжения (15—30 В и 25—50 В). Плавное регулирование сварочного напряжения производится дистанционно реостатом.

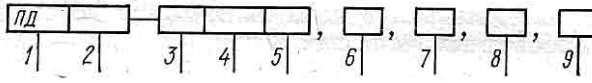
Сварочный ток генератора при сварке устанавливается сварщиком в зависимости от скорости подачи электродной проволоки.

Генератор для обеспечения нормальной коммутации имеет два добавочных полюса. При крутопадающих внешних характеристиках в цепь включаются 28 витков обмотки добавочных полюсов, а при жестких — 32 витка.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

СТРУКТУРЫ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ

Структура условного обозначения полуавтоматов по ГОСТ 18130—79:

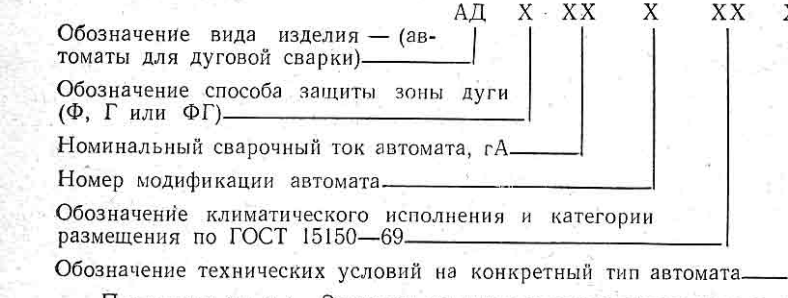


1 — обозначение вида изделия (полуавтоматы для дуговой сварки);
2 — обозначение способа защиты зоны дуги (Ф, Г, И, У, О);
3 — номинальный сварочный ток в сотнях ампер;
4 — номер модификации полуавтомата;
5 — вид климатического исполнения и размещения по ГОСТ 15150—69 и ГОСТ 15543—70;
6 — напряжение питающей сети в вольтах;
7 — частота питающей сети (указывается, если она не равна 50 Гц);
8 — относится к экспорту;
9 — обозначение технических условий на полуавтомат конкретного типа.

Пример условного обозначения полуавтомата для дуговой сварки в активных газах на номинальный сварочный ток 500 А, с номером модификации 16, климатического исполнения У, категории размещения 3, на напряжение питающей сети 380 В:

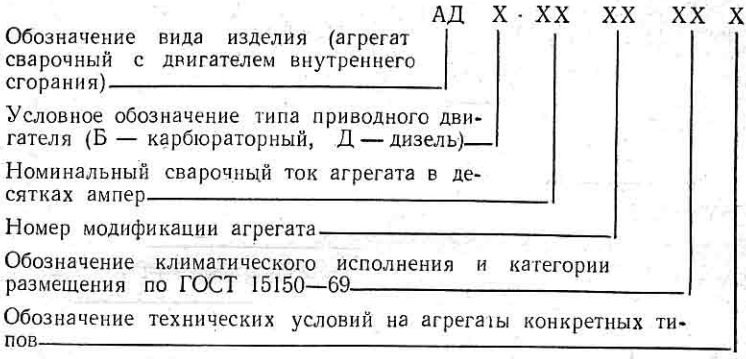
Полуавтомат ПДГ-516 УЗ, 380 В ТУ.

Структура условного обозначения автоматов по ГОСТ 8213—75:



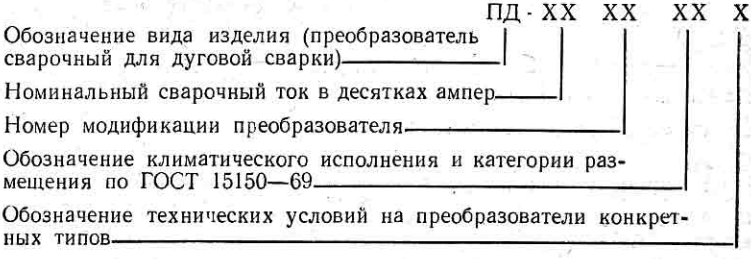
Примечание. Значение номинального сварочного тока в гектоамперах округляют до ближайшего целого числа.

Структура условного обозначения агрегатов по ГОСТ 2402—82:



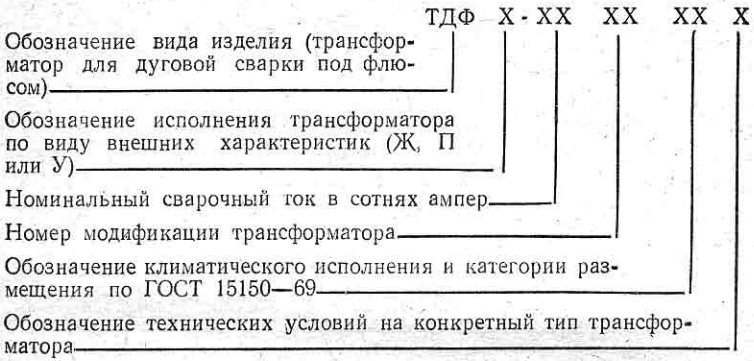
Примечание. Значение номинального сварочного тока в десятках ампер округляют до ближайшего целого числа.

Структура условного обозначения преобразователей по ГОСТ 7237—82:



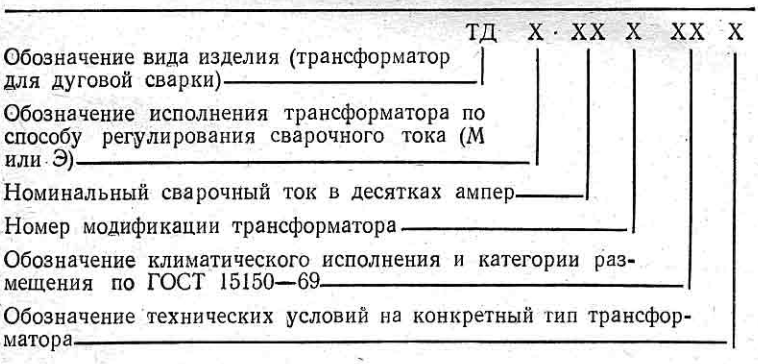
Примечание. Значение номинального сварочного тока преобразователя в десятках ампер округляют до ближайшего целого числа.

Структура условного обозначения трансформаторов для автоматической сварки под флюсом по ГОСТ 7012—77:



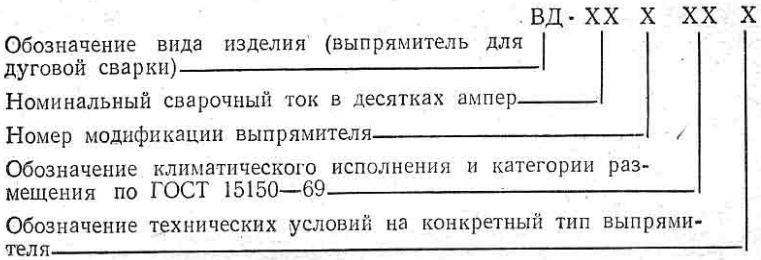
Примечание. Значение номинального сварочного тока в сотнях ампер для трансформаторов на 630 А округляют до 6.

Структура условного обозначения трансформаторов для ручной сварки по ГОСТ 95—77:



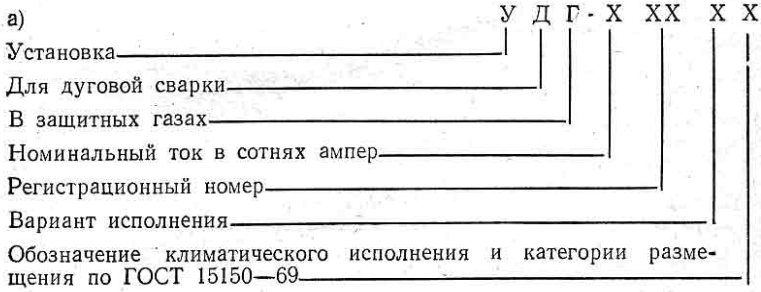
Примечание. При обозначении трансформаторов с номинальным током 125 и 315 А значение номинального тока округляется до 12 и 31 соответственно.

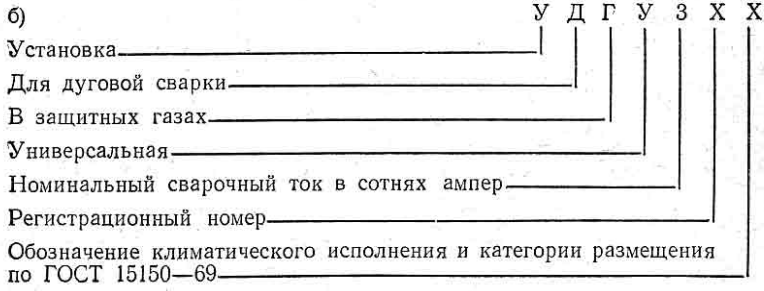
Структура условного обозначения выпрямителей для ручной дуговой сварки, а также полуавтоматической и автоматической сварки под флюсом по ГОСТ 13821—77:



Примечания: 1. Для выпрямителей на токи 125, 315 и 1250 А в десятках ампер значения токов округляют до 12, 30 и 120. 2. Выпрямители для сварки в среде активных и инертных газов имеют ту же структуру условного обозначения с добавлением к обозначению вида изделия обозначения способа защиты дуги: Г — активные газы; И — инертные.

Структура условного обозначения установок для сварки неплавящимся (вольфрамовым) электродом: а) по ТУ 539.073—78; б) по ТУ 739.302—82:





ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ОСНОВНЫЕ СИМВОЛИЧЕСКИЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ОБОРУДОВАНИИ ДУГОВОЙ СВАРКИ

 Переменный ток Сеть	 Включено и выключено Пуск и стоп одной кнопкой	 Выключено Стоп	 Аварийно Стоп
 Включено Пуск	 Готово к работе Готово к сварке	 Пульт дистанционного управления	 Ручное управление Наладка
 Автоматическая работа Автоматический режим	 Цепь управления	 Направление движения	 Скорость сварки
 Обдув Выход воздуха, газа	 Всасывание Вход воздуха, газа	 Слив Выход жидкости	 Охлаждение Вход жидкости
 Заземление	 Дуговая сварка Сварка включена	 Заварка кратера	 Горелка

 Газ	 Сварочный ток не включен	 Подача электродной проволоки от изделия	 Подача электродной проволоки к изделию
 Сварочный ток выключен	 Каретка Трактор	 Подогреватель газа	 Механизм подачи электродной проволоки
 Жесткая характеристика	 Падающая характеристика	 Изделие	 Воздух

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНЫХ ДЕЙСТВУЮЩИХ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ ПО БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА НА 1 ЯНВАРЯ 1986 г.

ГОСТ 12.3.002—75	ССБТ. Процессы производственные. Общие требования безопасности
ГОСТ 12.2.007.8—75	ССБТ. Устройства электросварочные и для плазменной обработки. Требования безопасности
ГОСТ 12.3.003—75	ССБТ. Работы электросварочные. Общие требования безопасности
ГОСТ 2601—74	Сварка металлов. Термины и определения основных понятий

ГОСТ 12.2.007.0—75	ССБТ. Изделия электротехнические. Общие требования безопасности
ГОСТ 14651—78	Электрододержатели для ручной дуговой сварки. Технические условия
ГОСТ 12.2.007.14—75	ССБТ. Кабели и кабельная арматура. Требования безопасности
ГОСТ 20741—81	Столы сварщика неповоротные. Технические условия
ГОСТ 9356—75	Рукава резиновые для газовой сварки и резки металлов. Технические условия
ГОСТ 12.1.007—76	ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности
ГОСТ 12.1.005—76	ССБТ. Воздух рабочей зоны. Общие санитарно-гигиенические требования
ГОСТ 12.1.003—83	ССБТ. Шум. Общие требования безопасности
ГОСТ 20445—75	Здания и сооружения промышленных предприятий. Метод измерения шума на рабочих местах
ГОСТ 22614—77	Система «человек—машина». Выключатели и переключатели клавишные и кнопочные. Общие эргономические требования
ГОСТ 22615—77	Система «человек—машина». Выключатели и переключатели типа «Тумблер». Общие эргономические требования
ГОСТ 12.3.009—76	ССБТ. Работы погрузочно-разгрузочные. Общие требования безопасности
ГОСТ 12.3.010—82	ССБТ. Тара производственная. Требования безопасности при эксплуатации
ОСТ 5.0241—78	ССБТ. Безопасность труда при строительстве и ремонте судов. Основные положения
ОСТ 5.9126—73	Сварка в судостроении и судоремонте. Правила аттестации сварщиков
ОСТ 5.0281—79	ССБТ. Организация контроля условий труда. Общие требования
ОСТ 5.9819—80	Соединения сварные. Контактная точечная и шовная сварка
СН 245—71	Санитарные нормы проектирования промышленных предприятий. (Утверждены Госстроем СССР, 1971 г.)
СНиП II-М.2-72	Производственные здания промышленных предприятий. Нормы проектирования. Строительные нормы и правила. (Утверждены Госстроем СССР, 1972 г.)
СНиП II-33-75	Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Нормы проектирования. (Утверждены Госстроем СССР, 1975 г.)
СНиП II-4-79	Естественное и искусственное освещение. Нормы проектирования. (Утверждены Госстроем СССР, 1979 г.)

Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением. (Утверждены Госгортехнадзором СССР, 1970 г., с дополнениями и изменениями, 1973 г.)

Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов. (Утверждены Госгортехнадзором СССР, 1969 г.)

Санитарные правила при работе с бериллием и его соединениями. (Утверждены МЗ СССР, 1972 г.)

Гигиеническая оценка сварочных материалов и способов сварки, наплавки и резки металлов. Методические указания. (Утверждены МЗ СССР, 1978 г.)

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В СВАРОЧНОЙ ДУГЕ

П4.1. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГАЗЕ И НА ГРАНИЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

В обычных условиях в газе отсутствуют свободные заряженные частицы — электроны и ионы, газ ведет себя как изолятор. Для того чтобы в газе мог течь ток проводимости, связанный с переносом заряда через газ (этот процесс называется газовым разрядом), заряженные частицы должны быть либо образованы в объеме газа путем разрушения нейтральных атомов и молекул, либо должны поступить в газ извне — из окружающих зону разряда тел.

Процесс образования заряженных частиц путем разрушения нейтральных атомов и молекул, а также процесс увеличения заряда ионов называется ионизацией. Обратный процесс называется деионизацией.

Процесс испускания заряженных частиц с поверхностей, ограничивающих зону разряда, называется эмиссией.

Кроме процессов ионизации и эмиссии, в газе при прохождении тока происходят и другие элементарные процессы, влияющие на процесс разряда: упругие столкновения заряженных и нейтральных частиц, их возбуждение, диссоциация молекул, диффузия, реактивация, рекомбинация и т. п.

Ионизация может происходить в результате взаимодействия молекулы или иона с электроном, ионом или нейтральной частицей или в результате поглощения фотона. Минимальная работа $W_{i\,\min}$, необходимая для ионизации, равна энергии связи электрона в молекуле, атоме или ионе и определяет ионизационный потенциал U_i:

$$W_{i\,\min} = q_e U_i, \qquad (П4.1)$$

где q_e — заряд электрона.

Ионизационный потенциал является индивидуальной характеристикой вещества. В табл. П4.1 представлены первые ионизационные потенциалы (определяемые энергией связи внешнего электрона) некоторых веществ. Здесь же приведены потенциалы возбуждения, в том числе метастабильных состояний, т. е. таких, в которых атом может находиться длительно.

Таблица П4.1

Вещество	Потенциал, В			Вещество	Потенциал, В		
	ионизации	возбуждения	метастабильный		ионизации	возбуждения	метастабильный
Ar	15,8	11,56	11,49; 11,66	Cu	7,7	1,4	—
				Fe	7,8	—	—
H	13,6	10,2	—	Ni	7,6	—	—
H_2	15,4	11,2	—	Na	5,1	2,1	—
N	14,5	6,3	—	K	4,3	1,6	—
He	24,6	20,9	19,8	CO_2	13,7	10,0	—
O	13,6	9,1	—	CO	14,1	6,0	—
O_2	12,2	—	—	N_2	15,5	6,1	—
Al	6,0	3,13	—				

Наибольшее значение для образования заряженных частиц имеют ионизация электронным ударом, фотоионизация и термоионизация (ионизация в результате столкновения нейтральных частиц в нормальном и возбужденном состоянии). Вероятности этих процессов характеризуются эффективными сечениями столкновения. Эти величины существенно зависят от энергии взаимодействующих частиц. При энергии, меньшей энергии ионизации или возбуждения, взаимодействие имеет характер упругих столкновений, т. е. приводит лишь к выравниванию кинетических энергий взаимодействующих частиц. При увеличении энергии взаимодействующих частиц вероятность неупругого взаимодействия достигает максимума и затем снижается (из-за сокращения времени взаимодействия). При этом процесс фотоионизации носит резонансный характер: при энергиях фотонов, близких к уровням возбуждения и ионизации, поглощение фотонов достигает максимумов, а при других энергиях фотонов (т. е. других частотах) газ оказывается прозрачным, не поглощающим фотонов.

Для характеристики процесса ионизации электронным ударом служит первый коэффициент Таунсенда — коэффициент ионизации α, показывающий, какое количество ионизаций совершает электрон при прохождении единицы длины в направлении против поля. Коэффициент α существенно зависит от напряженности ускоряющего электрон поля E и давления p. Теория дает для α следующую зависимость:

$$\alpha = \frac{p}{\lambda_e} \exp\left(-\frac{U_i}{\lambda_e E/p}\right), \qquad (П4.2)$$

где λ_e — длина свободного пробега электрона.

Однако многочисленные эксперименты позволяют представить зависимость α/p от поля в более простом виде:

$$\alpha = Ap\,(E/p - b)^n, \qquad (П4.3)$$

где n различно для различных газов (для аргона и воздуха $n \approx 2$); b определяет пороговое поле, при котором еще возможна ионизация,

Процесс ионизации сопровождается обратным процессом — деионизацией. Основными элементарными процессами при деионизации являются рекомбинация и диффузия заряженных частиц. Рекомбинация является процессом, обратным ионизации. Как и в случае ионизации, вероятность рекомбинации зависит от эффективного сечения столкновений и относительной скорости взаимодействующих частиц. Рекомбинация может происходить либо в тройных соударениях, либо с излучением избытка энергии взаимодействующих частиц.

В соответствии с общим принципом термодинамики в стационарном разряде между прямым и обратным процессами должно быть детальное равновесие, т. е. например, число актов ионизации электронным ударом должно равняться числу актов рекомбинации в тройных соударениях электрон—электрон—ион. Термическая ионизация уравновешивается рекомбинацией в столкновениях электрона с ионом и нейтральной частицей и т. д. Важным процессом, напоминающим по характеру рекомбинацию, является процесс образования отрицательных ионов, связанный с тем, что атомы некоторых газов способны удерживать около себя электрон, т. е. обладают «положительным сродством к электрону». Сродство к электрону приведено ниже:

Атом	H	N	O	Cl	Ar	He
Сродство к электрону, В	0,75	—0,6	2,2	3,8	—1,0	—0,53

Как и в случае рекомбинации, образование отрицательных ионов чаще всего происходит при тройных столкновениях. Вероятно также образование отрицательных ионов при взаимодействии электрона с многоатомной молекулой, сопровождающееся ее диссоциацией.

Как и процессы в объеме газа, процессы на граничных поверхностях делятся на прямые и обратные. Прямые процессы — это процессы эмиссии, обратные процессы — процессы поглощения, нейтрализации ионов на поверхности металла или диэлектрика, поверхностная реактивация возбужденных метастабильных атомов газа и т. п.

В металле электроны представляют собой единое сообщество. Как известно из квантовой механики, электрон обладает полуцелым спином, т. е. подчиняется статистике Ферми. В соответствии с принципом Паули в системе фермионов в данном состоянии не может находиться более одной частицы. Это приводит к тому, что кинетическая энергия электронов в металле даже при температуре, равной абсолютному нулю, не равна нулю и зависит от концентрации электронов. Наибольшая кинетическая энергия электрона в металле при температуре $T = 0$ называется энергией Ферми.

На границе металла с газом или вакуумом плотность частиц изменяется на несколько порядков. Находящийся вблизи границы электрон поляризует проводник своим электрическим полем, вызывая перераспределение зарядов в нем. Работа по преодолению сил, возникающих благодаря этой поляризации, составляет обычно несколько электрон-вольт. Кроме этого, на электрон действует также и поле двойного электрического слоя, образующегося у поверхности металла. Потенциал этого поля определяется энергией Ферми. Таким образом, чтобы покинуть металл, электрон должен преодолеть потенциальный барьер. При прохождении через барьер электрон совершает работу

$$W = w_m + 2kT, \qquad (П4.4)$$

где w_m — эффективная работа выхода, равная работе по преодолению силы изображения, возникающей вследствие поляризации; k — по-

стоянная Больцмана. Она характеризует энергию, необходимую наиболее быстрым электронам для преодоления потенциального барьера у поверхности металла при абсолютном нуле температуры. Полная потеря энергии в металле при токе эмиссии I равна

$$W = \frac{I}{q_e}(w_m + 2kT). \qquad (П4.5)$$

Величину w_m выражают в электрон-вольтах:

$$w_m = q_e U_{вых}.$$

Для некоторых металлов она приведена ниже:

Металл . . .	Cs	Fe	Hg	Ni	Th	W	K	Ba
Эффективная работа выхода, эВ . . .	4,4	4,77	4,53	5,03	3,35	4,52	2,2	2,52

Следует отметить, что наличие на поверхности металла мономолекулярного слоя другого металла значительно понижает работу выхода. Эффективная работа выхода из вольфрама с адсорбированным на его поверхности мономолекулярным слоем некоторых веществ приведена ниже:

Адсорбированный металл	Cs	Ba	Th	Zr
Работа выхода, эВ	1,36	1,56	2,63	3,14

Причиной эмиссии может быть высокая температура металла. Тогда эмиссия называется термоэлектронной. Плотность тока J термоэлектронной эмиссии может быть определена по формуле Ричардсона—Дешмена

$$j = AT^2 \exp[-w_m/(kT)]. \qquad (П4.6)$$

Необходимая для эмиссии энергия может быть доставлена электрону также фотонами или ионами, бомбардирующими эмитирующую поверхность.

Кроме механизма термоэмиссии возможен также механизм холодной или автоэлектронной эмиссии. В сильном электрическом поле происходит снижение потенциального барьера. В этом случае эмиссия возможна и при нулевой температуре (за счет туннельного эффекта). Зависимость плотности тока холодной эмиссии в сильном поле выражается эмпирической формулой

$$j = A(T + cE)^2 \exp\left(-\frac{bw_m}{T + cE}\right). \qquad (П4.7)$$

Формула справедлива при $T > 1000$ К. При температуре ниже 1000 К зависимость тока эмиссии от температуры практически отсутствует.

Особо велика холодная эмиссия сквозь тонкую пленку диэлектрика, на внешней поверхности которого имеется положительный заряд. Так бывает, например, в разряде с катодом из алюминия, на поверхности которого всегда присутствует слой окисла Al_2O_3. В этом случае заметная эмиссия происходит при напряжении на пленке 10—20 В. На основе квантово-механических расчетов получено выраже-

ние для плотности тока автоэлектронной эмиссии через тонкую пленку диэлектрика:

$$j = AE \exp(-bw_m/E). \qquad (П4.8)$$

Снижение потенциального барьера между металлом и газом при наличии диэлектрика на поверхности металла сказывается также и на плотности тока термоэлектронной эмиссии, которая в этом случае может быть выражена следующим образом:

$$j = AT^2 \exp\left(-\frac{w_m - b\sqrt{E}}{kT}\right). \qquad (П4.9)$$

Основное явление на поверхности анода — входящий в нее поток электронов. Вносимая при этом каждым электроном энергия определяется не только его кинетической энергией до входа в металл $w_к$, но и эффективной работой выхода w_m:

$$W = w_к + w_m,$$

где $w_к$ — кинетическая энергия электронов.

Полная энергия, вносимая в анод при токе I, составит

$$W = \frac{I}{q_e}(w_m + w_к). \qquad (П4.10)$$

Кроме основных процессов по испусканию и поглощению электронов, на твердых поверхностях протекают процессы нейтрализации положительных ионов (главным образом на катоде), отрицательных ионов (главным образом на аноде) и аккомодации нейтральных атомов. При ионной бомбардировке происходит передача энергии иона электронному газу металла. При этом имеет место вызванная этой бомбардировкой электронная эмиссия, называющаяся вторичной и характеризуемая коэффициентом γ, определяющим выход вторичных электронов на один ион.

Важную роль играет также и процесс фотоэмиссии. Как и все фотопроцессы, фотоэмиссия имеет четкий нижний порог, определяемый эффективной работой выхода.

П4.2. НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПЛАЗМА

В важных для сварки видах электрического тока в газе—дуге, тлеющем разряде, искре — значительная область разряда занята плазмой — квазинейтральной смесью заряженных и нейтральных частиц. Если степень ионизации газа, т. е. доля заряженных частиц x, невелика ($x \ll 1$), то плазма называется низкотемпературной или слабоионизированной. В газовом разряде плазма находится, как правило, именно в этом состоянии. Плазма, температура всех составляющих которой одинакова во всем объеме, называется изотермической. Плазму можно рассматривать как непрерывную среду, характеризуемую температурой, энтальпией, плотностью, теплопроводностью, электропроводностью, прозрачностью и т. п. Возможность рассмотрения плазмы как непрерывной среды определяется поляризационной длиной, или радиусом экранирования, $r_д$ (радиус Дебая). Для изотермической плазмы

$$r_д = \frac{69}{\sqrt{1+Z^*}}\sqrt{\frac{T}{n_e}}; \quad Z^* = \frac{\sum Z_\alpha n_\alpha}{n_e},$$

где Z_α, Z^* — истинный и эффективный заряд ионов; n_α, n_e — плотность ионов и электронов.

Если характерный размер плазмы $r \ll r_Д$, плазму можно рассматривать как квазинейтральную. Время установления поляризационной структуры плазмы (время релаксации)

$$\tau_Д \approx 0{,}1\varepsilon n_e^{-1/2}.$$

Как уже упоминалось, прямые и обратные процессы в стационарном случае должны находиться в детальном равновесии. Для изотермической плазмы, т. е. плазмы, в которой температуры электронов, ионов и нейтральных частиц равны, степень ионизации x определяется уравнением Саха, вытекающим из этого условия:

$$\frac{x^2}{1-x^2} = \frac{2g_p}{g_g}\left(\frac{2\pi m_e}{h^2}\right)^{3/2}\frac{(kT)^{5/2}}{p}\exp\left[-q_eU_i/(kT)\right],$$

где g_g, g_p — статистические веса квантовых состояний атома и образующих ионов.

При обычной для газового разряда малой степени ионизации ($x^2 \ll 1$)

$$x \approx 0{,}252\left(\frac{g_p}{g_g}\right)^{1/2}\frac{T^{5/4}}{p^{1/2}}\exp\left(-5800U_i/T\right). \qquad (П4.11)$$

Для смеси газов вводится понятие об эффективной степени ионизации

$$x_{эф} = \sum n_i x_i/\left(\sum n_i\right). \qquad (П4.12)$$

Она может быть вычислена по формуле Саха по эффективному потенциалу ионизации смеси:

$$U_{i\,эф} = -\frac{T}{5800}\ln\sum\frac{n_i}{n}\exp\left(-5800U_i/T\right). \qquad (П4.13)$$

Отношение статистических весов ионов и атомов g_p/g_g для некоторых веществ представлено ниже:

Элемент . .	H	He	C	O	Al	Ar	Fe	Ni	Cu	W
g_p/g_g . . .	1	4	4/3	8/3	1	4	12/5	8/3	3	4/5

Основные теплофизические характеристики равновесной плазмы, рассматриваемой как сплошная среда: тепло- и электропроводность η и σ, теплосодержание h, внутренняя энергия E — являются функциями температуры T. Эти функции — сложные, немонотонные. Если вместо температуры плазмы использовать в качестве независимой переменной обобщенную теплопроводность S (называемую иногда тепловым потенциалом):

$$S = \int_{T_0}^{T}\eta dT, \qquad (П4.14)$$

где η — коэффициент теплопроводности, то зависимость теплофизических функций от этой величины носит более простой характер, чем

зависимость от температуры. В частности, функции $h(S)$, $E(S)$ и $\Psi(S) = T/\mu$, где μ — эффективная молекулярная масса, могут быть успешно аппроксимированы линейными зависимостями, а электропроводность σ — степенной зависимостью:

$$h = h_0 + h_1 S;\ E = E_0 + E_1 S;\ \Psi = \Psi_0 + \Psi_1 S;\ \sigma = \sigma_n S^n. \quad (П4.15)$$

Коэффициенты и показатель n аппроксимирующих формул зависят от состава газа. Показатель n для различных газов заключен между 2 и 3, для аргона и воздуха $n \approx 2$.

Применение простых аппроксимирующих формул позволяет значительно упростить решение ряда вопросов, связанных с теорией столба электрической дуги.

П4.3. ФОРМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА В ГАЗЕ

В газе в реальных условиях всегда содержится некоторое количество заряженных частиц. Эти частицы образованы при отсутствии поля за счет внешних ионизаторов — ультрафиолетового или более жесткого излучения, естественной радиоактивности земли и т. п. и за счет столкновения наиболее быстрых атомов и молекул газа (далекий хвост распределения по скорости). Поэтому при приложении к газу электрического поля в газе начинает течь электрический ток. Значение этого тока зависит от мощности внешних ионизаторов и стремится к нулю при ее уменьшении. Такой ток называется несамостоятельным. Этот ток не подчиняется закону Ома; он растет быстрее, чем напряженность вызвавшего его электрического поля. Это вызвано тем, что разгоняющиеся полем заряженные частицы (по существу, только электроны) сами становятся способны ионизировать газ и, таким образом, увеличивать число носителей заряда в газе. Рост числа носителей и переносимый ими ток i подчиняются экспоненциальному закону:

$$i = i_0 \exp(\alpha l).$$

Здесь l — длина разрядного промежутка; i_0 — начальный ток (при $E \to 0$).

С учетом не только ионизации в объеме, но и вторичной эмиссии на катоде зависимость тока от поля приобретает еще более резкий характер:

$$i = i_0 \frac{\exp(\alpha l)}{1 - \gamma[\exp(\alpha l) - 1]}.$$

При некотором поле ток существует и при отсутствии внешних ионизаторов. В этом случае разряд называется самостоятельным. В зависимости от того, каков основной механизм, создающий ионизацию в объеме газа, и механизм эмиссии с катода, различаются формы самостоятельного разряда.

Ток в процессе разряда может быть постоянным и изменяющимся во времени. В первом случае разряд называется стационарным, во втором — нестационарным. Если в нестационарном разряде форма разряда остается неизменной, разряд называется установившимся, в противном случае — неустановившимся. Из наиболее важных для сварки форм разряда к установившимся принадлежат тлеющий и дуговой, к неустановившимся — искровой разряд. Все эти формы тесно связаны между собой и переходят из одной в другую. Упрощенная классификация различных форм разряда представлена на рис. П4.1.

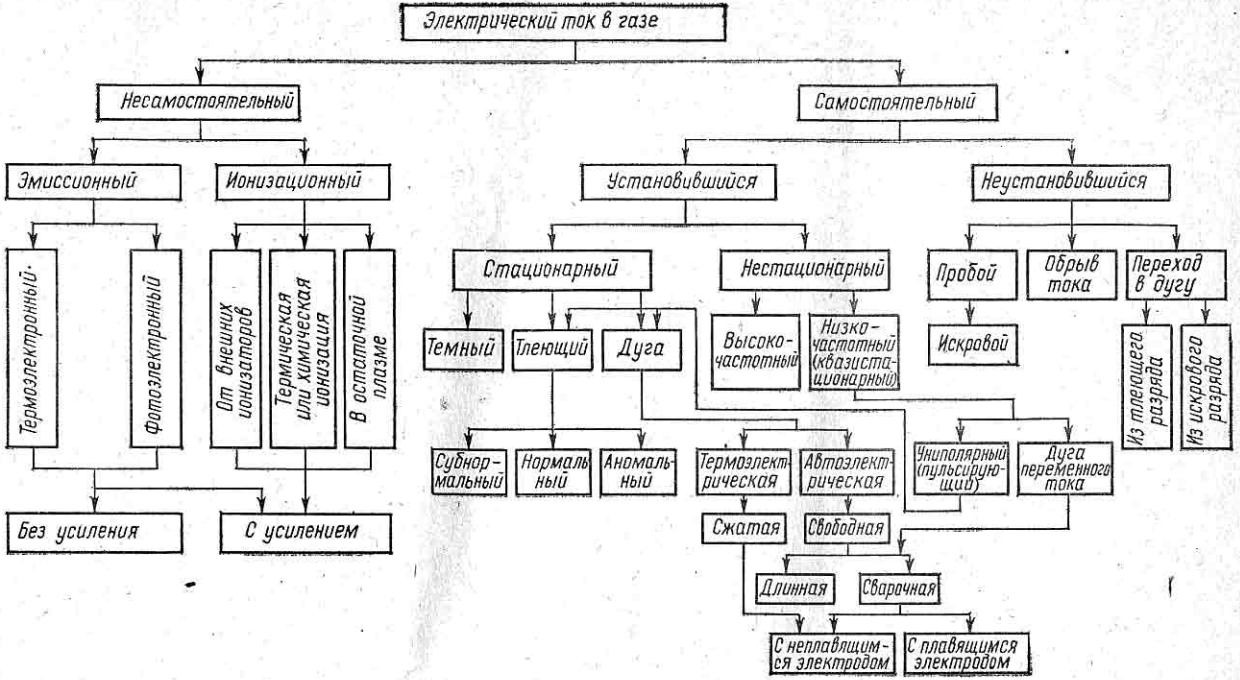


Рис. П4,1. Формы газового разряда

Если несамостоятельный ток обусловлен внешними факторами, то переход от него к самостоятельному току называется пробоем или возбуждением (зажиганием) разряда. Если же условия для появления несамостоятельного тока созданы предшествующей историей разряда, процесс перехода к самостоятельному току называется повторным зажиганием. Этот процесс особенно важен для разряда переменного тока.

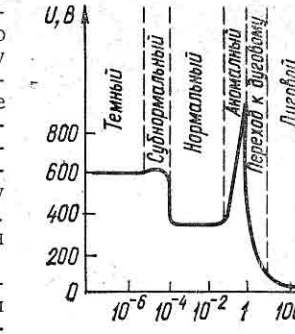


Рис. П4.2. Вольт-амперная характеристика тлеющего и дугового разрядов

Важнейшей характеристикой разряда является зависимость между током и напряжением на разрядном промежутке (вольт-амперная, или внешняя, характеристика — ВАХ). Различают статическую и динамическую ВАХ. Динамическая ВАХ связывает между собой ток, напряжение и производные этих величин. Порядок уравнения ВАХ зависит от числа учтенных резервуаров энергии тока. Обычно для установившихся форм разряда основной является энергия кинетического движения молекул, атомов, ионов и электронов, т. е. тепловая энергия, в общем случае характеризуемая температурой. В этом случае динамическая ВАХ описывается уравнением первого порядка. Статическая ВАХ получается из динамической при бесконечно медленном изменении тока. Различные виды разряда характеризуются и различной зависимостью напряжения разряда от тока. На рис. П4.2 схематически представлен вид статической ВАХ для переходящих друг в друга установившихся форм разряда — тлеющего и дугового.

Тлеющий разряд — один из видов самоподдерживающегося разряда, имеющий место при холодных электродах и небольших токах — до 1—2 А. Этот вид разряда часто является переходной стадией при повторных зажиганиях дугового разряда переменного тока.

Разрядный промежуток при тлеющем разряде почти полностью заполнен плазмой. Благодаря ее высокой проводимости почти все напряжение, приложенное к промежутку, сосредоточено вблизи катода в весьма узкой зоне. Здесь и происходят основные процессы образования заряженных частиц, эмитируемых катодом за счет ионной бомбардировки его поверхности. Образовавшиеся электроны ускоряются сильным прикатодным полем и приобретают энергию, достаточную для ионизации атомов газа. Поступающие в газ электроны поддерживают его высокую проводимость, а образовавшиеся в результате ионизации положительные ионы возвращаются к катоду, бомбардируют его и таким образом создают необходимую для поддержания постоянства тока эмиссию. Разряд характеризуется неоднородностью свечения. Область, где сосредоточена большая часть приложенного напряжения, называется областью катодного падения. В этой области происходит ускорение электронов, эмитирующих из катода, и ионов, движущихся к катоду. Вследствие малой энергии электронов соударения здесь носят в основном упругий характер, и эта область разряда практически не излучает. Характерным для этой области является также и избыточный положительный объемный заряд, вызванный тем, что электроны, имеющие высокие скорости дрейфа, покидают ее быстрее, чем медленные положительные ионы.

Затем следует зона яркого свечения, в которой происходят процессы неупругих соударений — ионизации и возбуждения с последующим излучением при рекомбинации и нормализации. Потерявшие свою энергию быстрые электроны из катодного пространства поступают в следующую область — фарадеево темное пространство, где вновь ускоряются, и поступают в плазменный столб со слабым полем, где имеет место ударная ионизация.

По характеру вольт-амперной зависимости в области катодного падения различают несколько стадий тлеющего разряда. При малых токах эта зависимость является падающей. Эта стадия, являющаяся переходной от темного к тлеющему разряду, носит название субнормального тлеющего разряда, в ней происходит формирование положительного объемного заряда и катода. При достижении некоторого тока разряд переходит в свою нормальную стадию, характеризуемую постоянством катодного падения напряжения при изменении тока. Такая форма вольт-амперной характеристики объясняется тем, что увеличение тока приводит к расширению области катода, с которой происходит эмиссия электронов, и поперечного сечения столба разряда. Катодное падение напряжения в этой стадии зависит только от состояния и свойств газа в разрядном промежутке. Дальнейший рост тока приводит к контракции (стягиванию) разряда и росту катодного падения. Причиной контракции считают усиление сжимающего разряд магнитного поля. Дальнейшее увеличение тока приводит к еще большему возрастанию его плотности и изменению механизма ионизации — образуется дуга, характеризующаяся резким падением напряжения на промежутке.

Напряжение зажигания тлеющего разряда в аргоне для чистого алюминиевого катода при атмосферном давлении составляет около 600 В. Однако алюминиевый катод в реальных условиях всегда покрыт пленкой окисла. Это приводит к резкому изменению формы потенциального барьера у поверхности металла и появлению еще одной формы тлеющего разряда — так называемого диффузного разряда. В аргоне напряжение зажигания в его субнормальной стадии 80—90 В, напряжение горения при нормальных условиях 60—80 В, в аномальной стадии — до 220 В. Диффузный разряд, если не принимать специальных мер, является неустановившимся — со временем происходит разрушение пленки ионной бомбардировкой и напряжение горения растет.

Среди неустановившихся форм разряда в процессах зажигания дуги важную роль играет искровой разряд.

При приложении электрического поля к газовому промежутку имеющиеся в нем заряженные частицы разгоняются полем (так как масса ионов намного превышает массу электронов, то при взаимодействии основную роль играют электроны). Если энергия электрона при этом окажется достаточной для ионизации газа, число заряженных частиц будет увеличиваться, в направлении от катода к аноду будут двигаться электронные лавины, оставляя за собой малоподвижный положительный объемный заряд. Случайные электроны и электроны, образованные в газе при фотоионизации вследствие излучения возбужденных электронами атомов и молекул, будут втягиваться в зону объемного заряда, создавая на своем пути новые дочерние лавины. Благодаря этому в газе образуется плазменный канал-стример, прорастающий от анода к катоду. Головка стримера несет положительный заряд. При приближении к катоду головка стримера многократно усиливает поле вблизи катода, что приводит к автоэлектронной эмис-

сии из катода. В результате между катодом и анодом образуется проводящий мостик, по которому электроны проводимости движутся от катода к аноду, многократно увеличивая степень ионизации и проводимость канала; развивается искровой разряд.

Для этой формы разряда характерны весьма высокая температура электронов плазмы в канале разряда и высокая степень ионизации газа. Благодаря выделению значительной энергии в малом объеме за короткое время, канал разряда быстро расширяется, образуя ударную волну, распространяющуюся впереди тепловой волны. На фронте тепловой волны происходят основные процессы ионизации. Вся область разряда разбивается, таким образом, на три зоны: канал разряда (в нем происходит выделение энергии), оболочку (в ней происходят процессы ионизации) и зону ударного сжатия. По мере расширения канала и уменьшения поступления удельной энергии ударная волна отрывается от тепловой и распространяется далее, превращаясь в дальнейшем в акустическую; в оболочке преобладающими становятся процессы деионизации, размеры канала уменьшаются, разряд затухает.

Несмотря на значительный интерес исследователей к искровому разряду, теории процесса, объясняющей всю совокупность известных фактов, не существует. В основу приближенной теории кладется обычно гипотеза Теплера, по которой проводимость канала G пропорциональна прошедшему через промежуток заряду:

$$G = k \int_0^t i dt,$$

или гипотеза Вайцеля и Ромпе, по которой вся выделяемая в канале энергия идет на увеличение внутренней энергии плазмы и пропорциональной ей проводимости канала; в этом случае

$$G = k \left(\int_0^t i^2 \, dt \right)^{1/2}.$$

Обе теории описывают начальную стадию процесса и не учитывают спад проводимости в его завершающей стадии.

Гидродинамическая теория при энергии импульса, характерной для искрового поджига сварочной дуги, приводит к следующей зависимости проводимости от напряжения на промежутке:

$$G = kCl^{-7/3} (U^2 - u^2)^{3/2} \left[6U^4 \ln \frac{U}{u} - \frac{3}{2} (U^2 - u^2)(3U^2 - u^2) \right]^{-1/6},$$

где C — емкость, непосредственно подключенная к искровому промежутку; l — длина промежутка; U — начальное напряжение на нем (приблизительно равное напряжению пробоя).

Наибольшего значения проводимость канала достигает при $u = 0{,}26U$ и составляет

$$G_{max} \approx 0{,}72kC \, (U/l)^{7/3}. \qquad (П4.16)$$

Для воздуха $k \approx 800$.

П4.4. ДУГОВОЙ РАЗРЯД. СТОЛБ ДУГИ

Дуговой разряд или, иначе говоря, электрическая дуга — форма электрического тока в газе, феноменологически характеризуемая большими токами и малыми напряжениями горения. Основным процес-

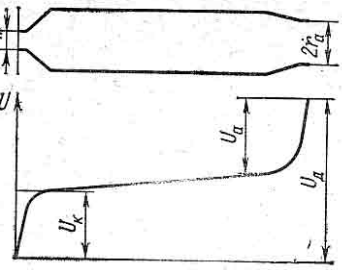


Рис. П4.3. Распределение потенциала по длине дуги

сом в дуге является термическая ионизация в столбе. Существенно отличают ее от тлеющего разряда и процессы на катоде. В отличие от тлеющего разряда катодное падение потенциала весьма мало и не может быть объяснено ионной бомбардировкой; для дуги характерны термоэлектронные и автотермоэлектронные процессы на катоде. В случае когда дуга поддерживается за счет термоэмиссии, ее катод называют горячим; если же термоэмиссия недостаточна, говорят о дуге с холодным катодом. Из практически применяемых материалов лишь вольфрам и уголь могут сохраняться в твердом или жидком состоянии при характерных для катода дуги температурах (с заметным током термической эмиссии), именно эти материалы и являются материалами для горячего «неплавящегося» катода.

Распределение потенциала в дуге показано на рис. П4.3. Здесь видны три характерные области: прикатодная, прианодная и столб дуги. Область катодного падения характеризуется также уменьшением диаметра дуги. На катоде дуга стягивается в пятно малого диаметра. Длина этой области не превышает нескольких длин свободного пробега ионов, т. е. равна 10^{-6}—10^{-7} м. Контракция (стягивание) дуги часто имеет место и у анода. Длина области анодного падения по порядку величины равна длине свободного пробега электрона, т. е. 10^{-5}—10^{-6} м. Основной объем дугового разряда занимает столб — область, поле в которой мало.

Поступающие из прикатодной области в столб дуги быстрые электроны в плотном газе быстро передают свою энергию тяжелым частицам — ионам, атомам, молекулам. Скорость выравнивания температуры определяется временем релаксации (своим для каждого элементарного процесса). Время релаксации в упругих столкновениях может быть определено из выражения

$$\tau_{\text{упр}} \approx 2{,}8 \cdot 10^5 T_e^{3/2} M n_e^{-1} (\ln \Lambda)^{-1} Z^{-2},$$

где $\ln \Lambda$ — кулоновский логарифм, определяющий ослабление взаимодействия из-за взаимного экранирования.

Для газов в нормальном состоянии $\tau_{\text{упр}} \approx 10^{-13}$ с.

Анализ показывает, что почти столь же быстро устанавливается ионизационное равновесие:

$$\tau_{\text{и}} \approx (\alpha n_e)^{-1} \approx 10^{-7} \text{ с}$$

и процессы рекомбинации:

$$\tau_{\text{рек}} \approx 10^{20} T_e^{9/2} n_e^{-2} Z^{-3} \approx 10^{-8} \text{ с}.$$

Поэтому плазму в дуговом разряде можно считать равновесной даже для довольно быстрых процессов (с характерным масштабом времени порядка 10^{-6} с). Плазму можно считать также и локально

изотермической, так как соотношение температур легких и тяжелых частиц определяется выражением

$$\frac{T_e - T_g}{T_e} \approx \frac{1}{g}\left(\frac{q_e E}{p S_{ei}}\right)^2 \frac{m_g}{m_e} \ll 1,$$

где S_{ei} — сечение столкновения электрона с атомом; $g \approx 10^6$. При E/p малом, что имеет место в канале дуги, температура ионов меньше температуры электронов лишь на несколько процентов. В первом приближении эта разница может не учитываться.

Таким образом, столб дуги при атмосферном давлении представляет собой квазиизотермическую плазму. Происходящие в ней процессы описаны выше (см. § П4.2). Важнейшей характеристикой дуги является ее вольт-амперная зависимость (ВАХ). Эта зависимость может быть получена из феноменологических уравнений, описывающих плазму разряда. Основным является уравнение баланса энергии в единице объема. Через обобщенную теплоемкость (тепловой потенциал) S это уравнение может быть записано в цилиндрических координатах в виде

$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} + \rho v \frac{\partial h}{\partial z} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r \frac{\partial S}{\partial r}\right) + jE - q_{\text{и}},$$

где ρ, v — плотность и скорость газа; r, z — цилиндрические координаты; $q_{\text{и}}$ — потери на излучение.

Первый член левой части этого уравнения дает изменение внутренней энергии плазмы, второй — увеличение энергии, вызываемое потоком газа, движущегося вдоль дуги со скоростью v. В правой части — приток энергии за счет теплопроводности, убыль энергии за счет излучения и тепловыделения в объеме благодаря прохождению тока. В этом уравнении не учтен ряд факторов, в том числе тепловые потоки вдоль оси вследствие теплопроводности. Аппроксимация зависимостей $E(S)$, $h(S)$, $\Psi(S)$, $q_{\text{и}}(S)$ сводит это уравнение к уравнению относительно одной неизвестной функции S, а усреднение его по объему столба дуги с учетом граничных условий дает возможность получить обыкновенное уравнение, связывающее между собой функцию S, ток i и напряжение на столбе дуги u. Если, пользуясь законом Ома

$$i = \int_0^l E \cdot 2\pi dz \int_0^{r_{\text{д}}} \sigma(r)\, r dr; \qquad \int_0^{l_{\text{д}}} E dz = u \qquad \text{(П4.17)}$$

и уравнением (П4.15), из этого уравнения исключить функцию S, то получится зависимость между током и напряжением, т. е. ВАХ столба дуги:

$$\theta \frac{d}{dt}\left(\frac{i}{u}\right) + \frac{i}{u} = F(r_{\text{д}}, l_{\text{д}}, i, Q),$$

где $r_{\text{д}}$, $l_{\text{д}}$ — радиус и длина дуги; Q — расход газа; θ — постоянная времени дуги.

Конкретный вид функции F зависит от того, каковы условия теплообмена на поверхности дуги. Для сварочной дуги в продольном потоке газа эти условия выражаются законом Ньютона

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} + \varkappa (T - T_0) = 0.$$

В этом случае вольт-амперная характеристика имеет вид

$$\theta \frac{d}{dt}\left(\frac{i}{u}\right) + \frac{i}{u} = a i^{2-1/n} u^{1/n}, \qquad (П4.18)$$

где

$$\theta = \frac{k_1 p r_д^2}{n (Q/l + k)}; \quad a = \frac{k_2 r_д^{2/n}}{l_д^{1/n} (Q/l + k)};$$

k_1, k_2, k — коэффициенты, зависящие от аппроксимаций функций $E(S)$, $\Psi(S)$, $h(S)$ и $q_и(S)$ и от распределения функции S по сечению столба дуги; $\Psi = p/(\rho R)$; ρ — плотность; R — газовая постоянная; n — показатель степени в аппроксимации $\sigma = \sigma_n(S)$.

Для дуги постоянного тока (при $d/dt = 0$) из этого уравнения может быть получена статическая ВАХ столба дуги.

Статическая ВАХ столба дуги может быть получена и из некоторых других предположений. Исходя из общих термодинамических принципов, Штеенбек предложил «принцип минимума», утверждающий, что устойчивым является такое состояние плазмы столба, при котором поле в дуге минимально. Рассматривая «каналовую» модель столба, в которой принимается, что ток дуги равномерно распределен по сечению $\pi r_д^2$ канала дуги и температура T в каждом сечении постоянна, с учетом «принципа минимума» можно получить

$$T = 800 U_{i\,эф}; \qquad (П4.19)$$

$$r_д = 2{,}4 \cdot 10^3 I^{2/3} S_{eg}^{1/3} \left(\frac{g_g}{g_p}\right)^{1/6} U_{i\,эф}^{-19/12}; \qquad (П4.20)$$

$$U = 2{,}05 \cdot 10^8 U_{i\,эф}^{29/12} S_{eg} l_д \left(\frac{g_g}{g_p}\right)^{1/6} I^{-1/3}. \qquad (П4.21)$$

По характеру зависимости $U = AI^{-1/3}$ выражение (П4.21) совпадает с (П4.18) при $n = 2$.

Следует учесть, что при сварке дуга горит в основном в парах электродных металлов, потенциалы ионизации которых много ниже потенциалов ионизации газов. В особенности это относится к сварке плавящимся электродом. В то же время эффективный потенциал ионизации по выражению (П4.13) определяется главным образом потенциалом ионизации наиболее легко ионизируемого компонента плазмы даже при небольшой его концентрации. Это следует учитывать при использовании выражений (П4.19) — (П4.21). При сварке неплавящимся электродом в потоке инертного газа влияние материалов изделия и электрода на $U_{i\,эф}$ незначительно, так как поток газа не дает парам возможности проникнуть в столб дуги. При сварке неплавящимся электродом в контролируемой атмосфере (в камере) влияние электродов более заметно.

П4.5. ПРИЭЛЕКТРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СВАРОЧНОЙ ДУГЕ

Вблизи катода сварочной дуги имеет место сложная совокупность процессов, благодаря которой ток из относительно холодного катода проходит в горячую плазму. Ток может переноситься электронами эмиссии и ионами плазмы столба дуги. Из-за большей подвижности электронов вблизи катода образуется нескомпенсированный объемный заряд, обеспечивающий катодное падение потенциала $U_к$. Кроме того, около катода существует область перехода между столбом и суженной катодной областью (зона сужения, или контракции). Здесь напряженность поля также выше, чем в столбе (рис. П4.3). В зоне катодного падения потенциала ускоряются электроны и положительные ионы, благодаря чему электроны могут производить ударную ионизацию, а ионы — переносить значительно бо́льшую долю тока, чем в плазме столба.

Катод получает энергию от ионов, приносящих свою энергию нейтрализации и кинетическую энергию движения, и из плазмы столба вследствие теплопроводности и излучения. Полученная энергия уходит на компенсацию работы выхода электронов, на теплопроводность и излучение катода, на его плавление и испарение и на диссоциацию молекулярных газов. Доля всех этих составляющих различна в зависимости от условий, в которых горит дуга. Среди этих условий основную роль играет материал катода. Различают два типа катодов: «неплавящийся», или горячий, катод из тугоплавкого материала, в основном вольфрама или угля, и «плавящийся», или холодный, катод из легкоплавких материалов. На тугоплавком катоде образуется стационарное сильно излучающее узкое пятно. При увеличении температуры катода до некоторого критического значения пятно скачком исчезает, сужение столба вблизи катода отсутствует. На легкоплавком катоде образуется нестационарное пятно, быстро перемещающееся по поверхности катода.

Вольт-амперная зависимость катодного участка столба дуги при малых токах — падающая, далее — горизонтальная.

Значения катодного падения потенциала $U_к$ трудно поддаются измерениям. Усредненные результаты измерений по данным различных авторов приведены ниже для дуги в воздухе:

Элемент	Fe	Cu	Al	C
Значение $U_к$, В	15	13	13,5	9

Температура катода близка к температуре плавления металла. Плотности тока на катод, измеренные по площади пятна, колеблются от 10^9 А/м^2 в дугах с пятном до 10^7 А/м^2 в дугах без пятна. Теории, описывающей катодные явления и объясняющей весь имеющийся фактический материал о явлениях на катоде, нет. Лучше всего явления на тугоплавком электроде описывает теория термоэлектронной дуги. По этой теории ток из катода обеспечивается термоэлектронами и ионами.

Плотность термоэлектронного тока определяется формулой Ричардсона—Дешмена (П4.6) или с учетом искажения потенциального барьера — формулой (П4.9).

Необходимая для создания термоэлектронов энергия поставляется на катод ионами. В этом случае доля ионного тока j_p составляет

$$\frac{j_p}{j} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{к}} + U_{\text{нейтр}}}.$$

Для различных условий эта величина колеблется от 0,15 до 0,35. При меньших значениях доли ионного тока для объяснения необходимого нагрева катода нужно учитывать теплоотдачу из плазмы.

Термоэлектронная теория не в состоянии объяснить явления на катоде из легкоплавких материалов. В этом случае необходимая для образования пространственного заряда плотность тока у катода должна составлять не менее 10^{11} А/м^2. При учете наличия термоавтоэлектронов эта величина снижается до реальной 10^9 А/м^2. В автоэлектронной теории $j_p \ll i_e$, ток переносится электронами. Электроны в зоне катодного падения осуществляют ступенчатую ионизацию. Плотность термоавтоэлектронного тока определяется выражением (П4.7), а при наличии пленки диэлектрика — выражением (П4.8). При расчете плотности автоэлектронного тока следует учитывать также наличие микронеровностей на поверхности катода, из-за которых эффективная напряженность увеличивается в несколько раз. Однако, несмотря на все эти уточнения, автоэлектронная теория не в состоянии объяснить весь комплекс процессов на холодном катоде.

Возможно также допустить перенос тока ионами, поступающими из горячей плазмы столба. Термическая теория, развитая для сварочной дуги с плавящимся катодом, дает в этом случае удовлетворительное совпадение расчетных и наблюдаемых значений. Сущность рассматриваемой теории состоит в том, что термическая ионизация происходит в «ионизационном пространстве», вблизи катода, а в непосредственно примыкающей к катоду области электроны отсутствуют. Ионный ток создает в этой области положительный заряд и катодное падение напряжения.

В соответствии с этой теорией температура плазмы в ионизационном пространстве несколько превышает температуру плазмы в столбе (из-за сильного поля в этой области дуги). Однако эта разница невелика и можно предположить, что вся выделяющаяся в ионизационном пространстве энергия поступает на катод за счет теплопроводности, теплоотдача в пространство при этом не учитывается из-за малой протяженности этой области. Тогда средний ток ионов из этого пространства определяется уравнением Лэнгмюра

$$j_p = 0{,}83 \cdot 10^5 p^{1/2} m_p^{-1/2} \left(g_p/g_g\right)^{1/2} T^{3/4} \exp\left(-5800 U_i/T\right),$$

которое может быть аппроксимировано в условиях сварочной дуги ($p = 10^5$ Па) выражением

$$j_p = 1{,}9 \cdot 10^{-9} m_p^{-1/2} \left(g_g/g_p\right)^{1/2} T^5 U_i^{-3}. \qquad \text{(П4.22)}$$

Из уравнения баланса энергии в ионизационном пространстве

$$(j_e + j_p) E = -\frac{d}{dz}\left(\eta \frac{dt}{dz}\right),$$

уравнений, определяющих электронный и ионный токи через подвижности b_e и b_p и плотности зарядов ρ_e, ρ_p:

$$j_e = \rho_e b_e E; \quad j_p = \rho_p b_p E$$

и уравнения Пуассона

$$\frac{dE}{dz} = 4\pi(\rho_p - \rho_e)$$

получается

$$U_к \approx 2{,}3 \cdot 10^2 \frac{\Delta T^{3/5} \eta^{3/5}}{j_p^{2/5} b_p^{1/5}}, \qquad (П4.23)$$

где учтено, что $b_p \ll b_e$ и ток переносится в основном ионами, и обозначено $T - T_к = \Delta T$. Если в этом уравнении принять упрощенные выражения для η и b_p:

$$\eta = 10^{-21} \frac{\Psi^{1/2}}{S_{gg}}; \quad b_p = 4{,}3 \cdot 10^{-18} \frac{\Psi^{1/2}}{pS_{pg}},$$

где S_{gg}, S_{pg} — сечения столкновений атомов между собой и ионами, то

$$U_к \approx 1{,}8 \cdot 10^{-6} \frac{T_к^{1/5} \Delta T^{3/5}}{j_p^{2/5} m^{1/5} S_{gg}}. \qquad (П4.24)$$

Расчеты по выражению (П4.24) производятся обычно исходя из экспериментально определенной плотности катодного тока j_p. Невысокая точность в ее определении мало сказывается на результате, так как зависимость $U_к$ от j_p слабая. По величине j_p определяется также и температура «ионизационного пространства» из выражения (П4.22):

$$T = 55{,}6 \frac{U_i^{3/5} m_p^{1/10}}{j_p^{1/5}} \left(\frac{g_g}{g_p}\right)^{1/10} \approx 83 \frac{U_i^{3/5}}{j_p^{1/5}}, \qquad (П4.25)$$

входящая в выражение для ΔT. С достаточной для практики точностью здесь принято $m_p \approx 50$; $g_g \approx g_p$.

Экспериментальные данные по плотностям катодного тока, определенным различными исследователями, приведены ниже:

Материал катода	Fe	Cu	Al
Плотность тока, 10^{-7} А/см^2	1,8—2,6	2,0—2,6	1,6—2,4
Материал катода	Ti	Zn	Mo
Плотность тока, 10^{-7} А/см^2	1,9—2,5	4,0—7,0	1,5—2,0

Наличие в материале катода или в прикатодном пространстве легкоионизируемых элементов в значительной степени снижает плотность катодного тока.

Анодная область, как и катодная, характеризуется резким увеличением напряженности поля. Здесь часто наблюдается также сужение токового шнура. Анод не эмитирует ионы, и, следовательно, ток вблизи него переносится только электронами. Положительные ионы уходят под действием поля в сторону столба дуги, и вблизи анода образуется область отрицательного объемного заряда. Рассмотрение баланса

электронов и ионов вблизи анода приводит к выводу, что в этой области должна происходить интенсивная ионизация. Общепризнанной теории этого процесса не существует. Теория ионизации ударами электронов, ускоренных в области анодного падения, не может быть построена при значительном давлении газа, в частности в условиях электросварки, без логических противоречий. Более вероятен процесс термической ионизации, аналогичный описываемому термической теорией катодных процессов; термические электроны и являются носителями анодного тока. Замена параметров ионов на параметры электронов дает вместо выражения (П4.24) следующее выражение:

$$U_a \approx 2{,}65 \cdot 10^2 \frac{\Delta T^{3/5} \eta^{3/5}}{j_a^{2/5} b_e^{1/5}}. \qquad (П4.26)$$

Так как контракция токового шнура у анода либо вовсе отсутствует, либо невелика, можно принять, что $j_a \approx j_{ст}$, где $j_{ст}$—плотность тока в столбе — определяется из формулы (П4.20):

$$j_a \approx j_{ст} = \frac{I_д}{\pi r_д^2} = 5{,}5 \cdot 10^{-8} \frac{U_i^{38/15}}{I_д^{1/3} S_{eg}^{2/3}} \left(\frac{g_p}{g_g} \right)^{2/3}; \qquad (П4.27)$$

с учетом этого

$$U_a \approx 2 \cdot 10^5 \frac{\Delta T^{3/5} \eta^{3/5} S_{eg}^{4/15} I_д^{2/15}}{U_i^{19/15} b_e^{1/5}}. \qquad (П4.28)$$

Учитывая, что $b_e \approx 3{,}6 \cdot 10^{-16} T^{1/2}/(p S_{eg})$, при $p = 10^5$ Па из (П4.28) получаем

$$U_a \approx 6{,}8 \cdot 10^{-4} \frac{T_a^{1/5} \Delta T^{3/5} I_д^{2/15} S_{eg}^{7/15}}{U_i^{19/15} m^{3/10} S_{gg}^{3/5}} \left(\frac{g_g}{g_p} \right)^{2/15}. \qquad (П4.29)$$

Важную роль в приэлектродных процессах сварочных дуг играют плавление и испарение электродного металла и паровые струи.

Мощность, передаваемая аноду,

$$P_a = (U_a + U_{вых}) I_д.$$

Мощность, передаваемая катоду,

$$P_к = (U_к - U_{вых}) I_д.$$

Средняя интенсивность испарения анода

$$M_a = 0{,}67 I_д m \frac{U_к + U_{вых.а} - k_{пл.а} h_{Ta}}{9{,}4 \cdot 10^4 T_{исп} + 9{,}65 \cdot 10^7 U_i - h_{кип.а}}, \qquad (П4.30)$$

где $k_{пл.а}$, h_{Ta} — коэффициент расплавления и теплосодержание расплавленного металла при температуре анода; $T_{исп}$, $h_{кип.а}$ — температура кипения (испарения) и теплосодержание жидкого металла при $T_{кип}$.

Средняя интенсивность испарения катода

$$M_к = 0{,}67 I_д m \frac{U_к - U_{вых.к} - k_{пл.к} h_{Tк}}{9{,}4 \cdot 10^4 T_{исп} + 9{,}65 \cdot 10^7 U_i - h_{кип.к}}. \qquad (П4.31)$$

Коэффициенты расплавления и теплосодержание должны определяться экспериментально. Это связано с неопределенностью температуры поверхностей электродов.

Образованные в результате испарения потоки пара поступают в дугу и нагреваются там до температуры столба.

Вблизи электродов через ионизированный пар проходит ток дуги. При наличии контракции столба возникают сжимающие столб силы (пинч-эффект), вызывающие истекание из приэлектродной области струи пара. Скорость пара направлена перпендикулярно поверхности электрода и может быть оценена по скорости испарения и площади пятна дуги на электроде:

$$v = M/(\rho S),$$

где ρ — плотность пара. Оценки дают для стали значение 30—40 м/с Плазменные струи существенно влияют на процесс сварки, глубину проплавления, равновесие ванны расплавленного металла.

На поверхность электрода оказывают давление поток входящих в нее частиц, струя пара с противоположного электрода и реакция струи испускаемого пара. Это давление должно вызывать углубление пятна на жидкой поверхности электрода и уравновешиваться в стационарном состоянии гидростатическим давлением. Теоретические оценки, произведенные на основании термической теории приэлектродных процессов, дают в зоне катода значение давления, на 1,5—2 порядка превышающее измеренное. Оценка может быть улучшена, если учесть блуждание катодного пятна на поверхности катода и электродинамические силы; однако при этом вносится столь значительный произвол в оценку площади блуждания, что расчет теряет смысл. Давление на анод потока электронов может быть определено из выражения

$$p = {}_{\text{a}}\sqrt{\frac{m_e}{2q_e}\left(U_{\text{a}} - \frac{3}{2}kT/q_e\right)}. \qquad \text{(П4.32)}$$

Давление струи и пара и реакция испускаемой струи имеют один и тот же порядок и составляют несколько сотен паскаль. Они могут быть оценены по выражениям (П4.30) и (П4.31).

В термической теории приэлектродных процессов дуги принято, как и в теории каналовой дуги, что ток распределен равномерно по поверхности электродного пятна. Фактически ток распределен по сечению пятна нагрева неравномерно, также неравномерно распределена и плотность мощности. Эксперимент показывает, что это распределение близко к нормальному и охватывает зону, значительно превышающую активное пятно:

$$p(r) = P_{\max} \exp(-kr^2).$$

Коэффициент сосредоточенности k характеризует отношение общей мощности к ее максимальной плотности:

$$k = \pi \frac{P_{\max}}{p}, \quad \text{где } p = 2\pi \int_0^\infty p(r)\, rdr = 2\pi P_{\max} \int_0^\infty \exp(-kr^2)\, rdr.$$

Коэффициент сосредоточенности определяет целый ряд важных характеристик дуги и является предметом специального изучения.

П4.6. ОСОБЕННОСТИ ДУГИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Основные особенности дуги, изложенные в § П4.4 и П4.5, характерны для униполярных дуг, т. е. таких дуг, в которых направление тока не изменяется. Дуга переменного тока, т. е. дуга, в которой изменяется направление тока и, следовательно, один и тот же электрод которой переменно бывает то катодом, то анодом, обладает рядом особенностей. Эти особенности зависят от частоты тока. В сварочной технике чаще всего используются дуги промышленной частоты. Иногда используются также токи повышенной частоты (400—500 Гц). При таких частотах, как показано выше (см. П4.4), скорости релаксации основных процессов в плазме столба намного превышают скорости изменения основных параметров дуги — тока, напряжения, температуры компонентов. Плазму такого разряда можно считать в каждый данный момент времени локально равновесной и изотермической. Однако распределение температуры и ее значения в столбе такой дуги изменяются во времени; вообще говоря, меняются и размеры столба. В первом приближении, с учетом только тепловой инерционности столба, процессы в нем могут быть описаны уравнением (П4.18). В случае длинных дуг, т. е. таких, в которых процессы в столбе оказывают решающее влияние на характеристики дуги в целом, уравнение (П4.18) описывает поведение дуги почти в течение всего периода изменения тока, за исключением коротких промежутков времени вблизи моментов перехода тока через нуль. Характеристики дуги вблизи нуля тока должны рассматриваться обязательно с учетом приэлектродных процессов. С процессами погасания и повторного возбуждения дуги переменного тока связаны стабильность ее горения и возможность использования ее в сварочных целях, поэтому они тщательно изучаются.

Теория приэлектродных явлений в нестационарном случае не разработана. Эксперимент показывает, что поведение дуги переменного тока вблизи моментов изменения направления дугового тока (или полярности дугового напряжения) существенно зависит от свойств материала электродов и условий в дуговом промежутке. При этом поведение дуги в эти моменты на тугоплавком и легкоплавком электродах совершенно различно и зависит от направления изменения тока.

Эти особенности хорошо прослеживаются в дуге переменного тока при сварке вольфрамовым электродом в аргоне изделий из алюминия и его сплавов. На рис. П4.4 приведена типичная вольт-амперная характеристика такой дуги при высоком напряжении холостого хода источника, питающего дугу, и действующем токе дуги $I_д = 200$ А; направление обхода характеристики показано стрелками. Особенностями этой характеристики являются высокий пик напряжения повторного зажигания при переходе с прямой полярности (катод — вольфрамовый электрод) на обратную (катод — алюминиевое изделие) и незначительный пик при переходе с обратной полярности на прямую, разница в напряжении горения дуги прямой и обратной полярности, значительная площадь между восходящей (при возрастании тока) и нисходящей (при убывании тока) ветвями характеристики (гистерезис). Качественно ход этих процессов хорошо объясняется термоэмиссионной теорией неплавящегося катода и теорией автоэлектронной эмиссии из алюминиевого катода (или близкой в ней по выводам теорией термической ионизации в ионизационном пространстве). При переходе с обратной полярности на прямую разогретый в предыдущем полупериоде вольфрамовый электрод энергично эмитирует

электроны. Ток эмиссии определяется только температурой электрода, которая из-за малой теплопроводности вольфрама не успевает заметно измениться. Поэтому ток в дуге возникает при сколь угодно малом восстанавливающемся напряжении и растет вместе с ростом напряжения. Наблюдающийся при этом небольшой пик напряжения зажигания обусловлен падающей характеристикой дуги при малых токах. Напряжение горения дуги в течение всего полупериода полярности невелико. Это хорошо объясняется термической теорией катодных явлений: разность температур ионизационного пространства и катода в этом случае невелика, что и определяет малое значение катодного падения напряжения (см. § П4.24) и общего напряжения дуги. При переходе с прямой полярности на обратную процесс носит совсем другой характер. Для повторного возбуждения дуги на алюминиевом катоде (или в ионизационном пространстве вблизи него) должен быть создан источник электронов. Холодный алюминиевый электрод практически не эмитирует электроны, а электроны не могут появиться, пока поле не достигнет достаточной напряженности и не рассосется отрицательный объемный заряд, образовавшийся в предыдущий полупериод, когда изделие было анодом. Если предположить, как это следует из термической теории, что ток переносится ионами, то и тогда в ионизационном пространстве первоначальная ионизация может происходить только за счет электронов, поступающих из нового катода.

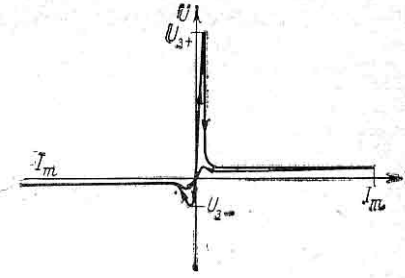


Рис. П4.4. Вольт-амперная характеристика дуги переменного тока

Таким образом, катод может быть образован на холодном металле только в результате автоэлектронной эмиссии, для которой необходима довольно высокая напряженность поля.

Более детальное изучение перехода напряжения дуги переменного тока с прямой полярности на обратную при сварке алюминия показало, что процесс носит еще более сложный характер. Из-за наличия пленки окисла Al_2O_3 на поверхности изделия резко понижается работа выхода из алюминия, уже при напряжении 60—80 В образуется так называемый диффузионный тлеющий разряд. После прохождения субнормальной стадии он переходит в свою нормальную стадию, в которой рост тока происходит при постоянном напряжении. В этой стадии происходит энергичная очистка сварочной ванны благодаря процессу катодного распыления. Дальнейший рост тока, вызванный восстановлением напряжения на разрядном промежутке, влечет за собой контракцию разряда у катода и переход его в аномальную стадию. В этой стадии рост тока сопровождается быстрым ростом напряжения на промежутке, достигающего при токе 1 А около 220—240 В. Дальнейшее увеличение тока приводит к быстрой перестройке катодных процессов, образуется дуговой разряд с характерным для него низким напряжением горения. Однако это напряжение значительно (на 10—12 В) выше, чем в полупериоде прямой полярности. В конце этого полупериода тока напряжение вновь возрастает на несколько вольт (из-за падающего характера ВАХ катодного падения напряже-

ния). Когда напряжение на промежутке становится недостаточным для поддержания тока, дуга гаснет. Повторное зажигание полуволны напряжения прямой полярности происходит так, как описано выше.

Описанные здесь процессы в той или иной степени характерны для любой сварочной дуги переменного тока. Переменный ток чаще всего применяется при сварке штучными электродами с обмазкой, при сварке плавящимся электродом под флюсом и при сварке неплавящимся электродом в аргоне алюминия и его сплавов. При сварке голыми стальными электродами наблюдается высокий пик напряжения зажигания в обоих полупериодах — прямой и обратной полярности. Восходящая и нисходящая ветви ВАХ в полупериод прямой полярности слегка расходятся, а в полупериод обратной полярности практически совпадают. Это объясняется, по-видимому, большим теплоотводом в изделие и, следовательно, малой тепловой инерцией прикатодной области. Наблюдающийся иногда сдвиг между током и напряжением на дуговом промежутке (запаздывание тока) при смене полярности объясняют термоэлектродвижущими силами и диффузионным характером переноса тока, по направлению противоположного приложенному к промежутку напряжению. Более вероятен здесь неучет индуктивности измерительной цепи и токов смещения в промежутке.

При сварке обмазанными электродами, когда дуга горит в атмосфере, содержащей пары легкоионизируемого металла, например калия, пик напряжения зажигания выражен значительно слабее, а разница восходящей и нисходящей ветвей более заметна. Было отмечено, что она растет с падением потенциала ионизации, в парах калия эта разница напряжений достигает 5—6 В. Так же действует на эту разницу и рост частоты тока: при частоте 2000 Гц она достигает у голых электродов 5 В. Эти данные подтверждают тепловой характер инерционных процессов в столбе дуги.

Процесс повторных зажиганий сварочной дуги переменного тока под флюсом носит специфический характер из-за шунтирующего действия расплавленного флюса и непрерывного изменения зазора между электродами благодаря подаче электродной проволоки в зону дуги. Внешние динамические характеристики такой дуги отличаются наличием возрастающего участка, что объясняется увеличением давления дуги и, следовательно, ее реальной длины с ростом тока. По этой же причине восходящая ветвь динамической характеристики иногда лежит выше нисходящей. Если при снятии характеристик приняты меры по исключению этого фактора, они становятся близки к характеристикам открытой дуги. Пики напряжений повторных зажиганий при сварке под флюсом велики, но скорости восстановления напряжения значительно ниже, чем в открытой дуге.

Для непрерывного горения дуги переменного тока при отсутствии специальных устройств, обеспечивающих повторные зажигания дуги после смены полярности дугового напряжения, необходимо, чтобы мгновенное значение напряжения питания в момент смены полярности превышало напряжение повторного зажигания. При синусоидальном напряжении питания $u = U_m \sin(\omega t + \psi)$ это приводит к ограничению, налагаемому на минимально допустимый угол сдвига ψ между током и напряжением:

$$\psi = \arcsin U_з/U_m, \qquad (П4.33)$$

где $U_з$ — напряжение повторного зажигания.

В активно-индуктивной цепи питания дуги переменного тока, описываемой уравнением

$$L\frac{\partial i}{dt}+R_i+U_{\text{д}}\operatorname{sgn} i=U_m\sin(\omega t+\psi), \qquad (\text{П4.34})$$

где $U_{\text{д}}$ — напряжение дуги (для простоты анализа принято, что напряжение дуги не зависит от тока и полярности), ток определяется выражением

$$i=\frac{U_m}{Z}\left[\sin(\omega t+\psi-\varphi)e^{-\omega t\operatorname{ctg}\varphi}\sin(\psi-\varphi)\right]-$$

$$-\frac{U_{\text{д}}}{R}(1-e^{-\omega t\operatorname{ctg}\varphi}), \qquad (\text{П4.35})$$

где $Z=\sqrt{R^2+\omega^2L^2}$; $\varphi=\operatorname{arctg}(\omega L/R)$.

Из условий непрерывности тока $i(\pi/\omega)=i(0)$ следует

$$\sin(\varphi-\psi)=\frac{U_{\text{д}}\operatorname{th}\left(\frac{\pi}{2}\operatorname{ctg}\varphi\right)}{U_m\cos\varphi}, \qquad (\text{П4.36})$$

и условие (П4.33) сводится к следующему:

$$U_{\text{з}}/U_m\leqslant\sin\left\{\varphi-\arcsin\left\{U_{\text{д}}\operatorname{th}\left[\frac{\pi}{2}\operatorname{ctg}\varphi/(U_m\cos\varphi)\right]\right\}\right\}.$$

В случае если $U_{\text{з}}=U_{\text{д}}$, это условие определяет минимальную кратность напряжения холостого хода источника по отношению к дуговому напряжению:

$$\frac{U_m}{U_{\text{д}}}>\frac{\sqrt{\left[1+\operatorname{th}\left(\frac{\pi}{2}\operatorname{ctg}\varphi\right)\right]^2+\operatorname{tg}^2\varphi\operatorname{th}^2\left(\frac{\pi}{2}\operatorname{ctg}\varphi\right)}}{\sin\varphi}. \qquad (\text{П4.37})$$

В частности, в чисто индуктивной цепи ($\cos\varphi=0$)

$$U_m/U_{\text{д}}>\sqrt{1+\pi^2/4}\approx 1{,}86.$$

В чисто активной цепи непрерывный ток не может существовать. Зависимость минимального значения $U_m/U_{\text{д}}$ от угла сдвига φ в короткозамкнутой цепи приведена на рис. П4.5.

Если условие (П4.33) не выполняется, дуга в цепи переменного тока без специальных устройств гореть не будет. При действующем напряжении холостого хода источника 60—90 В ($U_m=85\ldots127$ В), допустимом по требованиям безопасности при сварке, это условие выполняется лишь при наличии в флюсе или обмазке электродов легкоионизируемых присадок. При сварке неплавящимся электродом это условие при допустимых напряжениях питания вообще не может быть выполнено. Поэтому необходимо для стабильного горения дуги принимать специальные меры для ее повторного зажигания. С этой целью используют специальные устройства — стабилизаторы горения дуги (см. гл. 6), представляющие собой генераторы импульсов напряжения.

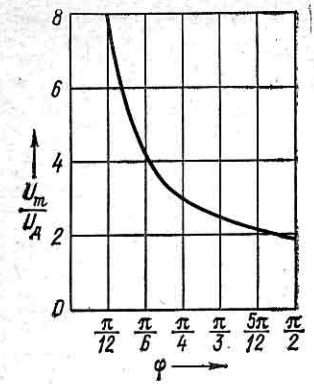


Рис. П4.5. Минимальное отношение амплитуды напряжения холостого хода к напряжению дуги в зависимости от угла сдвига, необходимое для существования направленного тока

При создании стабилизаторов необходимо учитывать реальный ход динамической ВАХ дуги. В частности, импульсы должны обеспечивать переход разряда из тлеющего в дуговой через стадию аномального тлеющего разряда. Поэтому энергия импульса должна быть достаточно велика — от 0,2 до 1 Дж. Необходимо также правильно выбрать момент инжекции импульса. При преждевременной инжекции импульса его энергия будет рассеяна до того, как возникнет тлеющий разряд, и переход через пик напряжения зажигания не будет обеспечен. Исследования показали, что стабилизирующий импульс должен быть инжектирован, когда тлеющий разряд уже сформирован. Эта стадия наступает через 60—200 мкс после смены полярности дугового напряжения (при сварке алюминия в аргоне). Задержка зависит от тока. Она минимальна при токе 150—250 А и растет при его уменьшении и увеличении. Объяснения такому ходу зависимости задержки от тока пока не найдено.

При выборе стабилизатора для обеспечения горения дуги при сварке штучными электродами и под флюсом необходимо учитывать, что пики напряжения зажигания возникают в каждый полупериод тока дуги. При выборе мощности стабилизатора для сварки под флюсом необходимо также учитывать шунтирующее действие флюсовой ванны. Кроме стабилизаторов дуги для стабилизации ее горения могут применяться осцилляторы — устройства, основным назначением которых является первоначальный поджиг дуги. Импульсы осциллятора обычно не синхронизированы с моментами перехода тока через нуль, поэтому при использовании их возможны перерывы в токе дуги. Кроме того, в ряде конструкций развиваемый осциллятором ток из-за большого внутреннего сопротивления источника импульсов недостаточен для надежной стабилизации дуги. Применение специальных стабилизаторов предпочтительнее. Если в осцилляторе (или возбудителе дуги) приняты специальные меры для его работы в качестве стабилизатора, то его называют возбудителем-стабилизатором.

Из-за разницы свойств и теплофизических характеристик электрода и изделия при сварке алюминия и его сплавов различаются напряжения горения дуги прямой и обратной полярности (см. § П4.5). При наличии разницы в напряжениях горения дуги прямой U_+ и обратной U_- полярности

$$u_+ = u_0(1-\varkappa); \quad u_- = -u_0(1+\varkappa);$$

$$u_0 = \frac{|U_+| + |U_-|}{2U_m}; \quad \varkappa = \frac{|U_-| - |U_+|}{2U_m}$$

длительность горения дуги обратной полярности θ_1 уменьшается, а длительность горения дуги прямой полярности θ_2 увеличивается:

$$\theta_1 = \pi (1 - \gamma); \quad \theta_2 = \pi (1 + \gamma); \quad \theta = \omega t.$$

Значение угла γ определяется при отсутствии активных сопротивлений в цепи дуги из условия равенства нулю среднего напряжения дуги за период, т. е. из условия отсутствия постоянной составляющей напряжения:

$$\theta_2 u_+ = \theta_1 u_-,$$

откуда $\gamma = \varkappa$.

Среднее значение тока в цепи дуги («постоянная составляющая») определяется выражением

$$I_{\text{ср}} = -\frac{\pi u_0}{2}(1 - \varkappa^2) + \sin\psi; \quad I_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{д. ср}}}{I_{\text{к. з}}},$$

где ψ — угол сдвига между током короткого замыкания $I_{\text{к. з}}$ и током дуги. Этот угол определяется выражением

$$\sin\psi = \frac{u_0\pi}{2}(1 - \varkappa^2) + \sin\frac{\pi\varkappa}{2}\sqrt{1 - \left(\frac{u_0\pi}{2}\frac{1 - \varkappa^2}{\cos\frac{\pi\varkappa}{2}}\right)^2},$$

откуда

$$I_{\text{ср}} = \sin\frac{\pi\varkappa}{2}\sqrt{1 - \left(\frac{u_0\pi}{2}\frac{1 - \varkappa^2}{\cos\frac{\pi\varkappa}{2}}\right)^2} \approx \sin\frac{\pi\varkappa}{2} \times$$

$$\times [1 - 1{,}234u_0^2(1 + 0{,}234\varkappa^2)].$$

При $\varkappa \to 0$ ток $I_{\text{ср}} \to 0$ (симметричный режим), при $\varkappa \to 1$ ток $I_{\text{ср}} \to 1$ (полное выпрямление).

При сварке алюминия вольфрамовым электродом $u_0 \approx 0{,}1 \ldots 0{,}2$; $\varkappa \approx 0{,}2 \ldots 0{,}4$ и, следовательно, $I_{\text{ср}}$ 0,3 ... 0,6.

Постоянная составляющая тока неблагоприятно воздействует на сварочный трансформатор, вызывая его подмагничивание, искажение формы и значительное увеличение первичного тока. Еще более существенны неблагоприятные технологические последствия уменьшения тока обратной полярности (см. гл. 6). Поэтому при сварке принимают специальные меры для компенсации постоянной составляющей тока.

Простейший путь снижения постоянной составляющей — включение в цепь дуги активного сопротивления. Наличие активного сопротивления приводит к уменьшению постоянной составляющей тока дуги:

$$I_{\text{ср}} = \frac{u_0}{\cos\varphi_0}(\varkappa - \gamma); \quad \cos\varphi_0 = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{\beta}{\sqrt{\beta^2 + \pi^2}},$$

где R, X — активное и реактивное сопротивления цепи дуги; $\beta = \pi R/X$;

$$\gamma = \frac{1}{\beta} \ln \left[\operatorname{ch} \beta + \operatorname{sh} \beta \left(\varkappa - \frac{\cos \varphi_0}{u_0} \sin \varphi \right) \right].$$

Угол может быть исключен из последнего выражения с помощью трансцендентного уравнения

$$\sin (\varphi - \pi\gamma) + e^{-\beta\gamma} \sin \varphi \operatorname{ch} \beta = e^{-\beta\gamma} (\operatorname{sh} \beta + \varkappa \operatorname{ch} \beta) \frac{u_0}{\cos \varphi_0} - \varkappa \frac{u_0}{\cos \varphi_0}.$$

Ограничиваясь первым приближением по β, получаем

$$\gamma \approx \varkappa + \frac{1}{2} \left(1 - \varkappa^2 - \frac{\beta\varkappa^2}{3} \right) \beta + \frac{\sin \varphi}{u_0 \pi} (1 - \beta\varkappa) \beta$$

и

$$I_{\text{ср}} \approx \frac{u_0 \pi}{2} \left[-(1 - \varkappa^2) + \frac{2}{3} \varkappa\beta \right] + \sin \varphi (1 - \varkappa\beta) \approx$$

$$\approx \frac{u_0 \pi}{2} \varkappa \left(\varkappa^2 - \frac{2}{3} \right) \beta + \sin \frac{\pi\varkappa}{2} (1 - \varkappa\beta) \times$$

$$\times \sqrt{1 - \left(\frac{u_0 \pi}{2} \frac{1 - \varkappa^2}{\cos \frac{\pi\varkappa}{2}} \right)^2}.$$

Как легко видеть, при достаточно малых $\varkappa < \sqrt{\frac{1 + 0{,}667 u_0}{u_0 (1 + 0{,}289 u_0)}}$

$$\frac{\partial I_{\text{ср}}}{\partial \beta} < 0$$

и, следовательно, увеличение активного сопротивления приводит к снижению среднего значения тока.

При допустимой из технологических соображений доле постоянной составляющей тока $I_{\text{ср}} = 0{,}07$ ($I_{\text{ср.д}}/I_{\text{эф}} \approx 0{,}1$)

$$\beta > \frac{1{,}5\varkappa - 0{,}07}{\varkappa (u_0 + 1{,}5\varkappa)} \quad \text{или} \quad \delta = \frac{R}{X} = \frac{\beta}{\pi} > \frac{0{,}5\varkappa - 0{,}02}{\varkappa (u_0 + 1{,}5\varkappa)}.$$

При аргонодуговой сварке алюминия $\varkappa \approx 0{,}3 \ldots 0{,}4$; $u_0 \approx 0{,}15 \ldots 0{,}2$; при этом $\delta > 0{,}7$.

Этот способ компенсации постоянной составляющей, несмотря на свою малую эффективность, получил широкое распространение в сборных постах для аргонодуговой сварки на переменном токе.

Эффективным способом устранения постоянной составляющей в токе дуги является последовательное включение в цепь дуги батареи конденсаторов. Среднее значение напряжения на батарее конденсаторов устанавливается равным половине разности напряжений прямой и обратной полярности:

$$U_{\text{С}} = (U_{\text{д. обр}} - U_{\text{д. пр}})/2 = \varkappa u_0 U_m.$$

Через конденсаторы проходит сварочный ток, создающий падение напряжения

$$U_{C\sim} = I/(\omega C).$$

Значения $U_{C=}$ и $U_{C\sim}$ для конденсаторов нормируются. Выражение для $U_{C\sim}$ определяет потребную емкость батареи:

$$C = I/(\omega U_{\text{доп}}),$$

где $U_{\text{доп}}$ — допустимая переменная составляющая напряжения на конденсаторах.

Постоянная составляющая тока может быть устранена включением диодно-тиристорной ячейки в цепь сварочного тока. Ячейка состоит из встречно-параллельно включенных диода и тиристора. Тиристор обеспечивает прохождение прямого тока, а диод — обратного. Угол открытия α тиристора должен удовлетворять условию

$$u_0\varkappa = \int_0^{\alpha} \cos(\theta - \psi)\, d\theta = \sin(\alpha - \psi) + \sin\psi.$$

При $\psi = 0$ ($\beta = 0$) условие $u_0\varkappa \approx \alpha$.

При сварке необходимо принять меры для сохранения непрерывности тока. С этой целью диодно-тиристорная ячейка обычно шунтируется активным сопротивлением.

П4.7. ВОЗБУЖДЕНИЕ СВАРОЧНОЙ ДУГИ

Основными способами возбуждения дуги являются возбуждение разрывом перемычки после короткого замыкания, пережиганием перемычки и пробоем промежутка высоковольтными импульсами. Первый способ применяется при сварке обмазанными электродами и толстыми электродами под флюсом, второй — при сварке плавящимся электродом в защитных газах, третий — при сварке неплавящимся электродом. Первый способ основан на разогреве и испарении микровыступов на торцах электродов и последующем разведении последних. При этом температура на торцах оказывается близкой к температуре кипения. В дальнейшем удаляющиеся электроды можно рассматривать как удаляющиеся друг от друга пластины конденсатора. Если внутреннее сопротивление источника питания дуги равно R, его напряжение холостого хода U_m, ускорение при разведении a, площадь микроконтактов S, то напряженность поля E в процессе разведения достигает максимума:

$$E_{\max} = 3\cdot 10^{10} U_m R^{-2/3} S^{-2/3} a^{-1/3}.$$

При характерных для сварочных цепей значениях U_m, R, S и a напряженность $E_m \geqslant 10^{14}$ В/м. Это поле вполне достаточно для обеспечения автоэлектронной эмиссии по выражениям (П4.8) или (П4.7).

В случае взрыва перемычки процесс возбуждения в первой стадии аналогичен описываемому. Возникающий при коротком замыкании ток от источника питания с жесткой характеристикой очень велик; при небольших диаметрах электродной проволоки в этом виде сварки плотность вводимой в нее энергии настолько велика, что происходит быстрый разогрев металла до температур, намного превышающих температуру кипения. Эта температура достаточна для термической

ионизации газа и термической эмиссии на электродах. Так, при замыкании проволоки диаметром 1 мм в ней выделяется около 20 МДж энергии. Этой энергии при адиабатном нагреве достаточно для получения плазмы с достаточной для разряда степенью ионизации.

Для пробоя газового промежутка необходимо, чтобы:

напряженность поля в промежутке была достаточна для эффективной ионизации с коэффициентом размножения больше 1;

в зоне достаточно высокого поля находились электроны, способные служить родоначальниками лавин;

развитие лавин приводило к образованию проводящего мостика между электродами;

на катоде был создан эффективный источник эмиссии электронов;

созданный в результате этого процесса плазменный канал имел проводимость, достаточную для прохождения большого тока.

Наибольшее влияние на напряжение пробоя оказывает геометрия промежутка, состав и давление газа в нем.

В случае однородного или квазиоднородного поля, когда во всех точках газоразрядного промежутка $E > E_{\text{пр}}$, для расчета напряжения статического пробоя применяется критерий Таунсенда, вытекающий из выражения для несамостоятельного тока:

$$\int_0^h \alpha_{\text{эф}}\, dz = K.$$

Здесь $\alpha_{\text{эф}}$ — эффективный коэффициент ионизации электронным ударом; h — длина промежутка; K — константа, учитывающая вторичные процессы на катоде: $K \approx \ln(1 + \gamma)$.

В области давлений 10^4—10^6 Па можно принять K зависящим только от состава газа и работы выхода катода. Так как последняя для большинства конструкционных металлов изменяется незначительно (от 4 до 5), то пробивное напряжение слабо зависит от материала электрода.

Учет аппроксимации для коэффициентов ионизации α приводит к следующему критерию пробоя:

$$U_{\text{пр}} = phb\varkappa + \sqrt{\frac{K}{A}}\sqrt{ph\varkappa},$$

где $\varkappa$ — геометрический фактор, учитывающий неоднородность поля:

$$\varkappa = \left[\frac{1}{h}\int_0^h \frac{E^2(z)}{U^2} h^2 dz\right]^{-1}.$$

Расчет $\varkappa$ требует предварительного знания распределения поля. Это распределение может быть приближенно вычислено по средней кривизне электродных поверхностей:

$$H_{\text{эл}} = \frac{1}{2}\left(R_{1\text{эл}}^{-1} + R_{2\text{эл}}^{-1}\right),$$

где $R_{1\text{эл}}$, $R_{2\text{эл}}$ — главные радиусы кривизны поверхности.

В слабонеоднородном поле, когда кривизна эквипотенциальных поверхностей примерно постоянна,

$$E(z) \approx \frac{2H \exp(-2Hz)}{1 - \exp(-2Hh)} U.$$

Тогда геометрический фактор

$$\varkappa \approx \operatorname{th}(hH)/(hH)$$

и

$$U_{\text{пр}} \approx \frac{pb}{H} \operatorname{th}(hH) + \sqrt{\frac{K}{A}} \sqrt{\frac{p}{H} \operatorname{th}(hH)}.$$

Когда неоднородность поля такова, что в некоторой точке $0 < z_0 < h$ напряженность $E(z_0) = b$, то критерий Таунсенда должен быть заменен на следующий:

$$\int_0^{z_0} \alpha_{\text{эф}} dz = K.$$

Величина z_0 находится из уравнения

$$\alpha_{\text{эф}}(z_0) = 0.$$

Приближенное значение корня этого уравнения

$$z_0 \approx \left(\frac{3}{4} \frac{K}{Apb^2H^2}\right)^{1/3}.$$

Значение пробивного напряжения в этом же приближении

$$U_{\text{пр}} = phb \{1 + 1{,}82 [K/(Apb^2H]^{1/3}\}.$$

При резко неоднородном поле необходимо для определения $\varkappa$ установить распределение поля $E(z)$. Для распределения поля, создаваемого заряженным стержнем над проводящей плоскостью,

$$E(z) = \frac{\cos\psi}{\operatorname{Arth}(\cos\psi)} \frac{h^2}{1 - z^2\cos^2\psi},$$

где $\operatorname{tg}\psi = d_{\text{эл}}/(2h)$;

$$U_{\text{пр}} = pbh \operatorname{Arth}(\cos\psi) \left(\frac{1}{\cos\psi} - \sqrt[3]{\frac{2K}{Apb^2h}}\right).$$

Установленное напряжение при бесконечно длительном воздействии приводит к пробою. При воздействии импульсного напряжения важную роль играет запаздывание разряда. Время запаздывания состоит из двух составляющих: времени до появления первого электрона, способного образовать лавину, т. е. статистического времени запаздывания, и времени формирования разряда. Время формирования разряда обычно мало (10^{-7}—10^{-9} с) (определяется временем дрейфа электрона со скоростью 10^5—10^6 м/с) и при длительности импульса порядка нескольких микросекунд может не учитываться. Время статистического запаздывания зависит от числа молекул в единице объема и от перенапряжения, т. е. превышения напряжения на промежутке над

статическим. Время статистического запаздывания выражается следующей экспериментальной зависимостью:

$$\tau = \tau_0 \frac{p_0 h_0}{ph} \left(\frac{U_{\text{пр. ст}}}{U_{\text{пр}} - U_{\text{пр. ст}}} \right)^3,$$

Зависимость напряжения пробоя от длительности импульса при фиксированной вероятности пробоя называется вольт-секундной характеристикой промежутка. Ввиду статистического характера зависимости времени запаздывания от напряжения на промежутке вольт-секундные характеристики при вероятности пробоя 0 и 1 ограничивают некоторую область, называемую вольт-секундной областью.

Вольт-секундная характеристика для вероятности пробоя 50 % обычно принимается за основу для расчета изоляции или пробойных импульсов. Для условий, существующих в сварочных установках, она может быть приближенно представлена выражением

$$U_{\text{пр}} = \left[1 + \left(\frac{a}{t_{\text{и}} ph} \right)^{1/3} \right] U_{\text{пр. ст}},$$

где $U_{\text{пр.ст}}$ определяется из расчета пробивного напряжения в статическом поле; a — константа, зависящая от рода газа; $t_{\text{и}}$ — длительность импульса.

На напряжение пробоя также влияет частота приложенного напряжения. Это влияние начинает сказываться при достаточной длине промежутка, когда образовавшиеся в объеме заряженные частицы не успевают уйти к электродам за полпериода приложенного напряжения. Критическая для данной длины промежутка частота определяется из трансцендентного уравнения

$$\left(\frac{\pi}{ap_0} \frac{f_{\text{кр}} h}{\lg f_{\text{кр}} - 3} - b \right)^2 ph = \frac{K}{A},$$

а снижение напряжения при воздействии на промежуток напряжения частоты f — из выражения

$$U_{\text{пр}\,f} = (1 - k \lg f / f_{\text{кр}})\, U_{\text{пр. ст}}.$$

Константа k определяется экспериментально. Для ряда газов она приведена ниже:

Газ	O_2	Воздух	H_2	Ar	N_2
Коэффициент k	0,02	0,02	0,01	0,03	0,03

Из-за малости коэффициента k и логарифмического вида зависимости напряжения от частоты при небольшом ее изменении вблизи критического значения эта зависимость может не учитываться.

Сразу же после пробоя промежутка через образовавшийся канал происходит разряд непосредственно присоединенной к промежутку емкости. Эта форма разряда называется искрой. При искре происходит гидродинамическое расширение канала разряда под воздействием сильно ионизированного горячего плазменного шнура. При этом проводимость сначала возрастает, а затем начинает падать. Исследования показали, что при малой мощности разряда (энергия разряда менее

0,1 Дж) в конце процесса сопротивление канала приближенно определяется выражением

$$R = k\,(l/U)^{1/3}\frac{1}{C}. \qquad (П4.38)$$

Здесь l — длина промежутка; C — присоединенная к электродам емкость; U — напряжение между электродами. Для воздуха $k \approx 800$.

После искрового разряда возможно, что разряд полностью затухнет, возникнет тлеющий разряд, возникнет дуговой разряд. Реализация этих возможностей зависит от условий в разрядном промежутке и свойств источника питания, присоединенного к нему.

Как показали исследования, дуга возникает в том случае, если сопротивление канала, образованного искровым разрядом, меньше некоторого порогового значения $R_{\text{пор}}$. Пороговое сопротивление зависит от скорости ввода мощности в канал, постоянной времени дуги θ, напряжения на промежутке и других факторов, влияющих на коэффициенты уравнения (П4.18), но не зависит от вида внешней статической характеристики и сопротивления цепи дуги. Приближенно для случая поджига дуги постоянного тока

$$R_{\text{пор}} \approx \left(\frac{n\theta \left.\frac{di}{dt}\right|_{t=0} U^{\frac{n+3}{n-1}} a^{\frac{n+1}{n-1}}}{2 + n\theta \left.\frac{di}{dt}\right|_{t=0} U^{\frac{n+1}{n-1}} a^{\frac{n}{n-1}}} \right)^{n}, \qquad (П4.39)$$

где U — напряжение холостого хода источника питания ($U = u(0)$); $\left.\frac{di}{dt}\right|_{t=0}$ — скорость нарастания тока в цепи питания дуги в начальный момент $\left(\left.\frac{di}{dt}\right|_{t=0} = U/L\right)$.

Таким образом, в случае поджига дуги постоянного тока сопротивление канала искрового разряда, созданного возбудителем дуги, определяемое выражением (П4.38), должно быть меньше порогового сопротивления $R_{\text{пор}}$ (по выражению П4.29). В противном случае стабильный дуговой разряд не возникает.

Теория поджига дуги переменного тока не разработана. Однако, учитывая малую скорость изменения тока и напряжения дуги переменного тока промышленной и близких к ней частот, можно считать, что условие $R_{\text{пор}} > R_{\text{искр}}$ имеет место и в этом случае и что $R_{\text{пор}}$ определяется тем же выражением (П4.39). Это выражение налагает определенные требования на момент включения возбудителя и начало генерации возбуждающего дугу импульса. Во-первых, возбуждение в значительной степени зависит, как и при постоянном токе, от напряжения на дуговом промежутке в момент поджига и поэтому поджиг должен производиться вблизи максимума этого напряжения; во-вторых, скорость нарастания тока должна быть достаточно большой. Поджиг наиболее эффективен, если момент поджига совпадает с моментом перехода установившегося тока через нуль. При более позднем поджиге

снижается скорость нарастания тока; более ранний поджиг, во-первых, будет происходить при меньших значениях напряжения и, во-вторых (и это главное), возникающий в цепи переходный ток в этом случае будет иметь направление, противоположное направлению установившегося тока, и в ближайшее время вновь поменяет направление. В этот момент возникающая дуга вновь погаснет.

Так как угол сдвига в чисто индуктивной сварочной цепи при пренебрежении активным сопротивлением при принятых режимах сварки неплавящимся электродом на переменном токе и допустимых по требованиям безопасности напряжениях холостого хода ($U_д/U_m$ = = 0,25 ... 0,15) $\varphi = \arccos\left(\frac{\pi}{2} U_д/U_m\right) \approx 67 \ldots 76°$, то целесообразно выбирать момент поджига за 10—15° до достижения максимума напряжения питания. Этот вывод подтверждается и тем, что в случае непрерывной работы осциллятора, посылающего в цепь дуги пакет несинхронизированных поджигающих импульсов, поджиг дуги осуществляется, как правило, импульсом, поступающим на промежуток именно при этой фазе питающего напряжения.

Рассмотренные выше условия зажигания дуги не учитывают условий на электродах. В то же время эти условия иногда весьма различны для дуги переменного тока, например при сварке алюминия вольфрамовым электродом. Как отмечалось, для возбуждения дуги с неплавящегося (вольфрамового) катода необходима термоэмиссия, в то время как алюминиевый катод, в особенности покрытый тонкой пленкой окисла Al_2O_3, является поставщиком автоэлектронов. Процесс нагрева термоэлектрода до температуры эмиссии — инерционный, требует большого времени; процесс автоэлектронной эмиссии практически безынерционен. Поэтому при переменном токе дуга зажигается с алюминия-катода значительно проще, чем с вольфрамового катода.

При поджиге дуги от непрерывно работающего осциллятора сначала появляются импульсы тока обратной полярности и лишь затем, после разогрева вольфрамового электрода, возникают и полуволны тока прямой полярности. В связи с этим современные возбудители дуги переменного тока генерируют лишь один импульс в период при фазе 75—80° питающего напряжения обратной полярности. Это позволяет значительно снизить мощность и уровень помех, создаваемых осциллятором, без снижения эффективности поджига.

П4.8. УСТОЙЧИВОСТЬ СВАРОЧНОЙ ДУГИ

Сварочная дуга в процессе работы подвергается действию ряда дестабилизирующих факторов — возмущений режима, связанных с изменением длины дуги, свойств газа в промежутке, условий охлаждения, перемещением электрода, случайными магнитными полями и др. Для практического применения пригодна лишь такая дуга, режим которой под воздействием малых кратковременных возмущений меняется мало, т. е. у которой возникшие под воздействием малых возмущений отклонения от режима также находятся в ограниченной области. Такая дуга называется устойчивой «в малом». Если с течением времени отклонения от установившегося режима, возникшие в результате кратковременного возмущения, стремятся к нулю, то такая устойчивость называется асимптотической. Если же в результате кратковременного воздействия возмущающих факторов, как бы малы они не были, дуга изменяет свой режим, то такая дуга называется неустойчивой «в малом».

Всякие возмущающие воздействия имеют конечную амплитуду. Может оказаться, что дуга, устойчивая «в малом», при достаточно больших кратковременных возмущающих воздействиях переходит в новое состояние. Область возмущений, в которой при кратковременном воздействии возмущающих факторов отклонения от режима затухают или остаются ограниченными, зависящими от величины возмущения, называется областью устойчивости «в большом», а сам режим, в котором эта область конечна, — устойчивым «в большом». Если же такая область отсутствует, режим называется неустойчивым. Такой режим в реальных условиях не может существовать, так как неизбежные флюктуации привели бы к его изменению. Естественно, что неустойчивый «в малом» режим неустойчив и «в большом». Аналогичное заключение об устойчивом «в малом» режиме, вообще говоря, неверно. Может оказаться, что устойчивый «в малом» режим неустойчив при любых конечных возмущениях, т. е. неустойчив «в большом». Однако в большинстве случаев существует некоторая конечная область возмущений, внутри которой режим, устойчивый «в малом», устойчив и «в большом». Поэтому в ряде случаев ограничиваются анализом устойчивости «в малом», методика которого хорошо разработана, в то время как оценка устойчивости «в большом» (а тем более, оценка размеров области устойчивости) представляет большие трудности.

Дуга характеризуется большим числом интегральных параметров, важных для сварки. Это — напряжение и ток дуги, ее длина, форма, положение в пространстве, положение анодного и катодного пятна и т. п. Естественно, что дуга, устойчивая по отношению к одному из факторов, может оказаться неустойчивой по отношению к другому. Наиболее важными параметрами являются ток и напряжение дуги. Устойчивость энергетического режима дуги, определяемого этими параметрами, называется энергетической. Устойчивость дуги в пространстве называется стабильностью дуги. Для сварки плавящимся электродом особенно важна стабильность условий плавления электрода.

Для оценки энергетической устойчивости дуги постоянного тока необходимо рассмотреть баланс энергии в цепи источника питания, содержащей дугу. Порядок уравнения энергетического баланса определяется числом учтенных резервуаров энергии в источнике питания и дуге. В первом приближении можно ограничиться для оценки устойчивости уравнением статической ВАХ и уравнением первого порядка для цепи питания:

$$\left.\begin{aligned} L\frac{di}{dt} + U_{д} &= U_{ист}(i);\\ U_{д} &= U_{д}(i), \end{aligned}\right\} \qquad (П4.40)$$

где $U_{ист}(i)$ — статическая внешняя характеристика источника; $U_{д}(i)$ — статическая ВАХ дуги; L — индуктивность цепи дуги.

Это уравнение имеет не зависящее от времени решение при токе i, удовлетворяющем уравнению

$$U_{д}(i) = U_{ист}(i).$$

Предположим, что вследствие каких-то факторов в момент времени $t = 0$ произошло внезапное изменение тока дуги: $i = i_0 + \Delta i_0$.

Тогда из уравнения (П4.40), разлагая функции $U_{\text{ист}}(i)$ и $U_{\text{д}}(i)$ в ряд и ограничиваясь линейными членами, можно найти

$$\Delta i = \Delta i_0 \exp\left[\frac{1}{L}\left(\frac{\partial U_{\text{ист}}}{\partial i} - \frac{\partial U_{\text{д}}}{\partial i}\right)\right]. \qquad \text{(П4.41)}$$

Отсюда следует, что случайное отклонение будет затухать, если $w = \partial U_{\text{д}}/\partial i - \partial U_{\text{ист}}/\partial i > 0$, и неограниченно возрастать в противоположном случае. Таким образом, устойчивой является та точка равновесия, в которой крутизна статической ВАХ дуги меньше, чем крутизна внешней характеристики источника питания.

Устойчивость режима может быть оценена количественно по скорости затухания возмущения, и, следовательно, она тем выше, чем круче характеристика источника питания. В случае ручной дуговой сварки, где возмущения особенно велики, сварку предпочитают вести от источника с так называемой «штыковой» характеристикой, имеющей участок, на котором ток не зависит от напряжения (т. е. источник представляет собой идеальный источник тока).

Оценка устойчивости по статической ВАХ дуги и без учета емкости, параллельной дуге, является очень грубой. Малые параметры, изменяющие порядок уравнений процесса, могут оказаться очень существенными при решении вопроса об устойчивости. К числу таких существенных малых параметров принадлежит постоянная времени дуги θ и значение емкости C, шунтирующей дугу.

Цепь, в которой параллельно дуговому промежутку подключена емкость, описывается следующей системой уравнений:

$$\left.\begin{aligned} L\frac{di}{dt} + u_{\text{д}} &= U_{\text{ист}}(i); \\ C\frac{du_{\text{д}}}{dt} &= i - i_{\text{д}}. \end{aligned}\right\} \qquad \text{(П4.42)}$$

Здесь i — полный ток источника питания; $U_{\text{ист}}(i)$ — его внешняя статическая характеристика; $U_{\text{д}}$, $i_{\text{д}}$ — напряжение и ток дуги.

Система (П4.42) должна быть дополнена динамической ВАХ дуги, которая может быть записана в виде

$$\theta\frac{dg}{dt} + g = \frac{i_{\text{д}}}{U_{\text{д}}(i_{\text{д}})}, \qquad \text{(П4.43)}$$

где $U_{\text{д}}(i_{\text{д}})$ — статическая ВАХ дуги.

Полагая, как и выше, отклонения режима от равновесного состояния $i = I_0 = i_{\text{д}}$; $u_{\text{д}} = U_0$ малыми:

$$\Delta i = i - I_0 \ll I_0; \quad \Delta u = u_{\text{д}} - U_0 \ll U_0; \quad \Delta i_{\text{д}} = i_{\text{д}} - I_0 \ll I_0$$

и ограничиваясь линейным приближением (что для грубых систем, к которым принадлежит дуга, достаточно для суждения об устойчи-

вости), можно получить следующую систему уравнений для возмущений:

$$\left.\begin{aligned} L\frac{d\Delta i}{dt} &= \frac{\partial U_{\text{ист}}}{\partial i}\Delta i - \Delta u_{\text{д}};\\ C\frac{d\Delta u_{\text{д}}}{dt} &= \Delta i - \Delta i_{\text{д}};\\ \theta\left(\frac{1}{I_0}\frac{d\Delta i_{\text{д}}}{dt} - \frac{1}{U_0}\frac{d\Delta u_{\text{д}}}{dt}\right) &= -\frac{1}{U_0}\frac{\partial U_{\text{д}}}{\partial i_{\text{д}}}\Delta i_{\text{д}} + \frac{1}{U_0}\Delta u_{\text{д}}. \end{aligned}\right\} \quad (\text{П4.44})$$

Характеристический определитель этой системы имеет вид

$$p^3 + \left(\frac{I_0}{U_0 C} - \frac{1}{L}\frac{\partial U_{\text{ист}}}{\partial i} + \frac{1}{\theta}\frac{I_0}{U_0}\frac{\partial U_{\text{д}}}{\partial i_{\text{д}}}\right)p^2 +$$

$$+\left(\frac{1}{LC} + \frac{I_0}{\theta C U_0} - \frac{1}{LC}\frac{I_0}{U_0}\frac{\partial U_{\text{ист}}}{\partial i} -\right.$$

$$\left. - \frac{1}{\theta L}\frac{I_0}{U_0}\frac{\partial U_{\text{д}}}{\partial i_{\text{д}}}\frac{\partial U_{\text{ист}}}{\partial i}\right)p + \frac{1}{LC\theta}\frac{I_0}{U_0}\frac{\partial U_{\text{д}}}{\partial i_{\text{д}}} -$$

$$- \frac{1}{LC\theta}\frac{I_0}{U_0}\frac{\partial U_{\text{ист}}}{\partial i} = 0.$$

Для устойчивости необходимо, чтобы все корни этого уравнения лежали в левой полуплоскости. В соответствии с критерием Гурвица для этого необходимо и достаточно, чтобы

$$\left.\begin{aligned} &\frac{1}{C} + \frac{1}{\theta}\frac{\partial U_{\text{д}}}{\partial i_{\text{д}}} - \frac{1}{L}\frac{U_0}{I_0}\frac{\partial U_{\text{ист}}}{\partial i} > 0;\\ &\frac{I_0}{U_0}\left(\frac{1}{C} + \frac{1}{\theta}\frac{\partial U_{\text{д}}}{\partial i_{\text{д}}} - \frac{1}{L}\frac{U_0}{I_0}\frac{\partial U_{\text{ист}}}{\partial i}\right)\left(\frac{L}{\theta} + \frac{U_0}{I_0} -\right.\\ &\left. - \frac{\partial U_{\text{ист}}}{\partial i} - \frac{C}{\theta}\frac{\partial U_{\text{д}}}{\partial i_{\text{д}}}\frac{\partial U_{\text{ист}}}{\partial i}\right) - \frac{1}{\theta}\left(\frac{\partial U_{\text{ист}}}{\partial i} -\right.\\ &\left. - \frac{\partial U_{\text{д}}}{\partial i_{\text{д}}}\right) > 0;\\ &\frac{\partial U_{\text{д}}}{\partial i_{\text{д}}} - \frac{\partial U_{\text{ист}}}{\partial i} > 0. \end{aligned}\right\} \quad (\text{П4.45})$$

Последнее условие в системе (П4.45) совпадает с (П4.41). Первое условие для сварочной дуги, где $CU_0^2 \ll LI_0^2$ и поэтому его последним членом можно пренебречь, сводится к

$$\frac{\theta}{C} > -\frac{\partial U_д}{\partial i_д}.$$

Это условие при крутопадающей характеристике дуги и малой ее инерционности трудновыполнимо и приводит к колебаниям режима при работе на малых токах (где абсолютная величина $\partial U_д/\partial i_д$ велика).

Второе условие в системе (П4.45) выполняется для сварочной дуги всегда, когда выполнено первое условие.

Анализ устойчивости дуги переменного тока может быть проведен в принципе теми же методами, что и дуги постоянного тока, но технически гораздо более сложен из-за того, что коэффициенты системы уравнений являются в этом случае функциями времени.

При малой частоте можно воспользоваться условиями (П4.45); при этом следует принимать значения всех входящих в (П4.45) величин, в том числе $\partial U_д/\partial i_д$ и I_0/U_0, в наиболее опасный для работы момент — при нуле тока дуги.

При сварке плавящимся электродом в защитных газах и под флюсом важнейшим показателем является устойчивость процесса саморегулирования дуги, заключающегося в поддержании постоянства длины и тока дуги при случайных ее отклонениях от установленного режима. Уравнения «в возмущениях» имеют вид

$$\left.\begin{aligned} &L\frac{d\Delta i}{dt} + \frac{\partial U_д}{\partial i_д}\Delta i + \frac{\partial U_д}{\partial l}\Delta l = \frac{\partial U_{ист}}{\partial i}\Delta i; \\ &\gamma S\frac{d\Delta l}{dt} = \gamma S\,(v_{пл} - v_{эл}) = \\ &= \left(k_{пл\,0} + I_0\frac{\partial k_{пл}}{\partial i}\right)\Delta i + I_0\frac{\partial k_{пл}}{\partial l}\Delta l. \end{aligned}\right\} \qquad (П4.46)$$

Здесь $v_{эл}$ — скорость подачи электрода; $v_{пл}$ — скорость плавления электрода; $k_{пл}$ — коэффициент плавления; S — сечение электрода; γ — плотность электрода.

Из анализа системы (П4.46) следует, что процесс саморегулирования будет устойчивым, если

$$\left.\begin{aligned} &\left(\frac{\partial U_{ист}}{\partial i} - \frac{\partial U_д}{\partial i_д}\right) I_0\frac{\partial k_{пл}}{\partial l} + \left(k_{пл} + I_0\frac{\partial k_{пл}}{\partial i}\right)\frac{\partial U_д}{\partial l} > 0; \\ &\frac{\partial U_д}{\partial i_д} - \frac{\partial U_{ист}}{\partial i} - \frac{LI_0}{\gamma S}\frac{\partial k_{пл}}{\partial l} > 0. \end{aligned}\right\}$$

(П4.47)

В условиях (П4.47) следует принимать за $\partial U_д/\partial l = E_{ст}$ напряженность поля столба дуги, так как приэлектродные зоны остаются

неизменными. Зависимость коэффициента плавления от длины дуги — падающая: $\partial k_{пл}/\partial l < 0$. Действительно, коэффициент $k_{пл}$ зависит главным образом от мощности, идущей на нагрев вылета, увеличивающейся при уменьшении длины дуги (так как приращение длины вылета обратно по знаку приращению длины дуги). Коэффициент $k_{пл}$ растет с током ($\partial k_{пл}/\partial i > 0$).

Из второго условия (П4.47)

$$\frac{\partial U_д}{\partial i_д} - \frac{\partial U_{ист}}{\partial i} + \frac{I_0}{\gamma S}\left|\frac{\partial k_{пл}}{\partial l}\right| > 0 \qquad (П4.47а)$$

следует, что требования к скорости спада характеристики источника при сварке плавящимся электродом могут быть ослаблены. В частности, при возрастающей и пологопадающей ВАХ дуги могут применяться источники питания с жесткими или даже слабовозрастающими характеристиками без нарушения устойчивого горения дуги (при $w < 0$). Однако первое из условий (П4.47)

$$wI_0\left|\frac{\partial k_{пл}}{\partial l}\right| - \left(k_{пл\,0} + I_0\frac{\partial k_{пл}}{\partial i}\right)E_{ст} > 0 \qquad (П4.47б)$$

требует положительности w, в противном случае плавление будет нестабильным, что скажется на общей нестабильности процесса сварки. Полагая в выражениях (П4.46) $L = 0$ и исключая из системы Δi, получим

$$\gamma S\frac{d\Delta l}{dt} = \left[I_0\frac{\partial k_{пл}}{\partial l} - \left(k_{пл\,0} + I_0\frac{\partial k_{пл}}{\partial i}\right)\frac{E_{ст}}{w}\right]\Delta l.$$

В этом уравнении величина

$$\theta_{пл} = \frac{\gamma S w}{\left(k_{пл\,0} + I_0\dfrac{\partial k_{пл}}{\partial i}\right)E_{ст} + wI_0\left|\dfrac{\partial k_{пл}}{\partial l}\right|} \qquad (П4.48)$$

играет роль постоянной времени саморегулирования дуги. Процесс саморегулирования идет тем быстрее, чем меньше $\theta_{пл}$, т. е. чем меньше w, больше коэффициент плавления, возрастающий с током, плотность тока в электроде $j_{эл} = I_0/S$ и выше напряженность поля в столбе $E_{ст}$. С этой целью используют источники с пологопадающими, жесткими или возрастающими характеристиками, большие токи, проволочные электроды малых диаметров и газы с высоким потенциалом ионизации (например, углекислый газ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Акулов А. И., Бельчук Г. А., Демянцевич В. П.** Технология и оборудование сварки плавлением. М.: Машиностроение, 1977.

2. **Алексеев Ю. Е., Кушнарев Л. Н.** Оборудование для дуговой сварки под флюсом. Л.: Энергия, 1977.

3. **Аппаратура** для механизированной дуговой и электрошлаковой сварки и наплавки/А. И. Чвертко, Б. Е. Патон, М. Г. Бельфор, Г. М. Гологовский. Киев: Наукова думка, 1978.

4. **А. с. 276289 СССР.** Устройство для дуговой сварки на переменном токе/С. М. Белинский, Б. А. Каганский//Открытия. Изобретения. 1970. № 23.

5. **А. с. 554967 СССР.** Устройство для дуговой сварки/В. К. Лебедев, И. И. Заруба, И. В. Пентегов и др.//Открытия. Изобретения. 1977. № 15.

6. **А. с. 707712 СССР.** Источник питания для электродуговой сварки/Ю. Н. Горлов М. И. Закс, Б. А. Каганский и др.//Открытия. Изобретения. 1980. № 1.

7. **Бокштейн Р. Л.** Сварка цилиндрической дугой труб с трубными досками из алюминия АД1//Сварочное производство. 1970. № 8. С. 15—16.

8. **Булгаков А. А.** Электронные устройства автоматического управления. М.: Госэнергоиздат, 1958.

9. **Гаген Ю. Г., Таран В. Д.** Сварка магнитоуправляемой дугой. М.: Машиностроение, 1970.

10. **Глебов Л. В., Горлов Ю. И., Струве Г. А.** Кольцевая схема выпрямления для многопостовых сварочных установок//Электротехника. 1972. № 1, С. 30—33.

11. **Грановский В. Л.** Электрический ток в газе. Т. 1. М.: ГИТТЛ, 1952.

12. **Грановский В. Л.** Электрический ток в газе. Установившийся ток. М.: Наука, 1971.

13. **Демянцевич В. П., Дулов С. И.** Технология электрической дуговой сварки. М.; Л.: Машгиз, 1959.

14. **Ерохин А. А., Букаров В. А., Ищенко Ю. С.** Влияние геометрии вольфрамового катода на некоторые характеристики сварочной дуги и проплавление металла//Сварочное производство. 1971. № 12. С. 17—19

15. **Иванников А. В.** Оптимизация форсированных режимов полуавтоматической сварки в CO_2//Электротехническая промышленность. Сер. Электросварка. 1973. Вып. 2 (17). С. 12—14.

16. **Иванников А. В.** Полуавтоматическая сварка в углекислом газе на форсированных режимах тонкими проволоками. Рига: Латв. республ. ин-т научно-техн. информации и пропаганды, 1973.

17. **Иванов Г. П., Рожанский З. Е., Сердюк Н. А.** Тиристорные регуляторы тока сварочных трансформаторов//Автоматическая сварка. 1973. № 11, С. 65—69.

18. **Игнатьев В. Г., Довбищенко И. В., Рабкин Д. М.** Проволока для сварки алюминия и его сплавов//Автоматическая сварка. 1975. № 7. С. 54—56.

19. **Испытания** тиристорного трансформатора для ручной сварки на 300 А/Б. А. Каганский, В. П. Рожков, Е. А. Воронина, В. А. Турулев//Электротехническая промышленность. Сер. Электросварка. 1979. Вып. 6 (57).

20. **Каганов И. Л.** Электронные и ионные преобразователи. М.: Госэнергоиздат, 1956.

21. **Катлер С. М., Бокштейн Р. Л.** Приварка труб к трубным решеткам цилиндрической дугой, управляемой магнитным полем//Сварочное производство. 1964. № 2, С. 11—14.

22. **Куняков Л. Д., Рожанский З. Е., Масянников В. И.** Сварка знакопеременными импульсами тока//Эксплуатация, модернизация и ремонт оборудования. 1972. № 3. С. 12—13.

23. **Кушнарев Л. Н.** Характеристики процесса электродуговой сварки в углекислом газе//Сварка, резка, пайка, наплавка и металлизация. М: ЦИТЭИ, 1960. Вып. 8. С. 3—21.

24. **Кушнарев Л. Н., Катлер С. М., Вилль В. И.** Исследование процесса сварки под флюсом применительно к разработке шланговых автоматов и полуавтоматов//Технология сварки. М.; Л.: Машгиз, 1951. С. 5—25.

25. **Леб Л.** Основные процессы электрических разрядов в газах: Пер. с англ./Под ред. Н. А. Капцова. М.: ГИТТЛ, 1950.

26. **Лесков Г. И.** Исследование процессов в дуге и источниках питания при переходе тока через нуль//Автоматическая сварка. 1963. № 2, С. 43—51.

27. **Лесков Г. И.** Электрическая сварочная дуга. М.: Машиностроение, 1970.

28. **Мечев В. С., Дудко Д. А.** Сварка дугой, вращающейся в магнитном поле//Автоматическая сварка. 1967. № 1. С. 59—62.

29. **Новожилов Н. М.** Основы металлургии дуговой сварки в газах. М.: Машиностроение, 1979.

30. **ОСТ 5. 9153—73.** Швы сварных соединений судовых корпусных конструкций. Аргонодуговая сварка деформируемых алюминиевых сплавов.

31. **ОСТ 5. 9083—72.** Корпуса стальных судов. Сварка углеродистых и низколегированных сталей.

32. **Патон Б. Е., Лебедев В. К.** Электрооборудование для дуговой и шлаковой сварки. М.: Машиностроение, 1966.

33. **Пирогова Н. Н., Рывкин А. Л., Роговой М. Д.** Однопостовые сварочные выпрямители для ручной дуговой сварки//Электротехника. 1982. № 5. С. 20—23.

34. **Порошковые проволоки** для электродуговой сварки: Каталог-справочник/Под ред. И. К. Походни. Киев: Наукова думка, 1980.

35. **Потапьевский А. Г.** Сварка в защитных газах плавящимся электродом. М.: Машиностроение, 1974.

36. **Рабинович И. Я.** Оборудование для дуговой электрической сварки. Источники питания. М.: Машгиз, 1958.

37. **Розенблат М. А.** Магнитные усилители: В 2-х т. М.: Советское радио, 1960.

38. **Руссо В. Л.** Дуговая сварка в инертных газах. Л.: Судостроение, 1984.

39. **Сварка** в машиностроении. Справочник: В 4-х т. М.: Машиностроение, 1978—1979.

40. **Сварка** в смеси активных газов/А. Е. Аснис, Л. М. Гутман, В. Р. Покладий, Я. М. Юзькив. Киев: Наукова думка, 1982.

41. **Сердюк Г. Б.** Вращение сварочной дуги на концентрических электродах при магнитном управлении//Сварочное производство. 1965. № 10. С. 1—3.

42. **Сиунов Н. С., Бирман У. И., Саламатов Г. П.** Влияние формы кривой сварочного тока на формирование шва и свойства сварного соединения при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом//Сварочное производство. 1975. № 4. С. 12—13.

43. **Справочник** сварщика/Под ред. В. В. Степанова. М.: Машиностроение, 1982.

44. **Справочник** по преобразовательной технике/Под ред. И. М. Чиненко. Киев: Техника, 1978.

45. **Технология** сварки металлов и сплавов плавлением/Под ред. Б. Е. Патона. М.: Машиностроение, 1974.

46. **Шмелева И. А.** Исследование процесса дугоконтактной сварки труб: Автореф. дис. насоиск. учен. степени канд. техн. наук. М., 1967.

47. **Takashi Araya.** Some Problems of Wire Feeder Semi-Automatic Arc Welding //Journal of the Gapan Welding Society. 1972. N 9. P. 43—51.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3
Введение 5

Глава первая. УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ 7

1.1. Области применения оборудования для дуговой сварки . . . . . —
1.2. Режимы работы 13
1.3. Условия эксплуатации, транспортирования и хранения в зависимости от воздействия климатических и механических факторов внешней среды 14
1.4. Техника безопасности 15

Глава вторая. ПОЛУАВТОМАТЫ И АВТОМАТЫ ДЛЯ СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ В СРЕДЕ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА И ПОД ФЛЮСОМ 31

2.1. Классификация . . . . . —
2.2. Требования к узлам . . . . . —
2.3. Конструкция и типы полуавтоматов 43
2.4. Конструкция автоматов 62
2.5. Блоки управления полуавтоматами и автоматами. Электродвигатели 80
2.6. Подготовка полуавтоматов и автоматов к работе и устранение неисправностей 96

Глава третья. СПЕЦИАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ . . . 99

3.1. Общие сведения . . . . . —
3.2. Конструкции узлов 109
3.3. Конструкции и типы установок 118

Глава четвертая. СВАРКА ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ ПОД ФЛЮСОМ И В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ 127

4.1. Сварка под флюсом . . . . . —
4.2. Сварка в углекислом газе 143

4.3. Сварка в смеси углекислого газа с кислородом . . . 164
4.4. Сварка в инертных газах 168
4.5. Сварка порошковой проволокой 176

Глава пятая. ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ДЛЯ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ 180

5.1. Назначение и особенности импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом (ИДСП) . . . . . —
5.2. Требования к источникам питания для ИДСП . . . 182
5.3. Способы формирования тока при ИДСП 187
5.4. Оборудование для ИДСП 190
5.5. Технология полуавтоматической и автоматической ИДСП 191
5.6. Выпрямитель ВДГИ-301. Опыт наладки и эксплуатации 198

Глава шестая. ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ В ИНЕРТНЫХ ГАЗАХ 221

6.1. Классификация и основные составные части оборудования . . . . . —
6.2. Особенности источников сварочного тока 223
6.3. Сварочные горелки 227
6.4. Устройства для поджига дуги 232
6.5. Стабилизаторы горения дуги 240
6.6. Цикл сварки 246
6.7. Установки для ручной сварки 249
6.8. Механизмы сварочных автоматов 251
6.9. Стабилизация длины дуги 255
6.10. Системы автоматического направления электрода по стыку 258
6.11. Автоматы для сварки неплавящимся электродом 272
6.12. Выбор основных параметров процесса аргонодуговой сварки 277
6.13. Техника и режимы сварки 284
6.14. Разновидности аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом 297
6.15. Эксплуатация, ремонт и наладка оборудования . . 306

Глава седьмая. ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГОЙ, УПРАВЛЯЕМОЙ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ 311

7.1. Физические основы и особенности сварки . . . . . —
7.2. Технология сварки 322
7.3. Оборудование 326

Глава восьмая. СВАРОЧНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ 340

8.1. Общие сведения . . . . . —
8.2. Сварочные трансформаторы с механическим регулированием 351
8.3. Трансформаторы, регулируемые подмагничиванием 367
8.4. Тиристорные трансформаторы 375
8.5. Серийные трансформаторы 410
8.6. Подключение, наладка и техническое обслуживание трансформаторов 428

Глава девятая. ВЫПРЯМИТЕЛИ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ 435

9.1. Общие сведения . . . . . —
9.2. Полупроводниковые вентили и особенности их работы в сварочных выпрямителях 436
9.3. Схемы выпрямления 443
9.4. Однопостовые сварочные выпрямители 453
9.5. Многопостовые сварочные выпрямители 513
9.6. Техническое обслуживание выпрямителей 519

Глава десятая. СВАРОЧНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ, ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И АГРЕГАТЫ 527

10.1. Классификация машинных источников питания и область их применения . . . . . —
10.2. Принципы работы и формирования статических и динамических характеристик коллекторных сварочных генераторов 528
10.3. Принципы работы и формирования статических и динамических характеристик вентильных сварочных генераторов 539
10.4. Сварочные преобразователи 547
10.5. Сварочные агрегаты 556

Приложение 1. СТРУКТУРЫ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ 606

Приложение 2. ОСНОВНЫЕ СИМВОЛИЧЕСКИЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ОБОРУДОВАНИИ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ 610

Приложение 3. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНЫХ ДЕЙСТВУЮЩИХ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ ПО БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА НА 1 ЯНВАРЯ 1986 г. 611

Приложение 4. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В СВАРОЧНОЙ ДУГЕ 613

П4.1. Основные элементарные процессы в газе и на граничных поверхностях . . . . . —
П4.2. Низкотемпературная плазма 617
П4.3. Формы электрического тока в газе 619
П4.4. Дуговой разряд. Столб дуги 623
П4.5. Приэлектродные процессы в сварочной дуге . . . 627
П4.6. Особенности дуги переменного тока 632
П4.7. Возбуждение сварочной дуги 639
П4.8. Устойчивость сварочной дуги 644

Список литературы 650

СПРАВОЧНОЕ ПОСОБИЕ

Станислав Михайлович Белинский
Александр Францевич Гарбуль
Владимир Георгиевич Гусаковский
Саулюс-Альгиманатас Антанович Диржис
Михаил Исаакович Закс
Альфред Васильевич Иванников
Борис Абрамович Каганский
Юозас Ионович Каросас
Евгений Васильевич Коллегов
Олег Михайлович Кулешов
Леонид Николаевич Кушнарев
Марк Соломонович Неймарк
Афанасий Антонович Печенин
Анатолий Лазаревич Рывкин
Вера Георгиевна Рывкина
Владимир Валерианович Смирнов
Борис Яковлевич Темкин
Михаил Петрович Соколов (составитель)
Юрий Викторович Цыганков

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ

Редактор *Л. М. Пархоменко*
Художественный редактор *Д. Р. Стевановић*
Технический редактор *А. Г. Рябкина*
Корректор *Р. А. Сафарова*

ИБ № 2463

Сдано в набор 02.02.86. Подписано в печать 15.04.86. М-32889.
Формат 84×108¹/₃₂. Бумага кн.-журн. имп. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 34,44. Усл. кр.-отт. 34,44. Уч.-изд. л. 39,61. Тираж 50000 экз. Заказ 23. Цена 2 р. 40 к.

Энергоатомиздат, Ленинградское отделение.
191065, Ленинград, Марсово поле, 1.

Ленинградская типография № 6 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
193144, Ленинград, ул. Моисеенко, 10.