МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
**«Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева»**

Н. В. Абабков

М. В. Пимонов

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

Рекомендовано в качестве учебного пособия
учебно-методической комиссией специальности
150202 «Оборудование и технология
сварочного производства»

Кемерово 2011

Рецензенты:

Останин О. А., старший преподаватель кафедры технологии машиностроения

Клепцов А.А., председатель УМК специальности 150202

«Оборудование и технология сварочного производства»

Абабков Николай Викторович, Пимонов Максим Владимирович. Технология и оборудование контактной сварки: учеб. пособие [Электронный ресурс]: для студентов специальности 150202 «Оборудование и технология сварочного производства» / Н.В. Абабков, М.В. Пимонов – Кемерово: КузГТУ, 2011.–1 электрон. опт. диск (CD–ROM); зв.; цв.; 12 см.– Систем. требования: Pentium IV; ОЗУ 256 Мб; Windows XP; (CD–ROM–дисковод); мышь.– Загл. с экрана.

В учебном пособии приведена классификация способов контактной сварки, рассмотрены особенности нагрева и формирования сварных соединений, технология сварки и оборудование. Описана конструкция современной электронной аппаратуры. Значительное внимание уделено специальным контактным машинам, механизации и автоматизации контактной сварки. Кратко описаны некоторые способы термомеханической и механической сварки (сварки давлением).

© Кузбасский государственный
технический университет, 2011
© Абабков Н. В., Пимонов М. В., 2011

ВВЕДЕНИЕ

Контактная сварка – термомеханический процесс образования неразъемного соединения металлов вследствие сцепления их атомов, при котором локальный нагрев свариваемых деталей протекающим электрическим током в зоне соединения сопровождается пластической деформацией, развивающейся под действием сжимающего усилия.

Межатомные связи при контактной сварке различными способами возникают в твердой фазе или через жидкую прослойку расплавленного металла и сохраняются после охлаждения и кристаллизации. Соединения при этом образуются в условиях сложных быстро меняющихся электрических и температурных полей при высоких скоростях нагрева и пластических деформаций.

Термин «контактная сварка», принятый в нашей стране, подчеркивает существование и определенное значение для нагрева контактных (переходных) сопротивлений. В зарубежных странах этот способ называют сваркой сопротивлением.

Основные способы контактной сварки разработаны в конце XIX столетия. В 1877 г. в США Э. Томсон предложил стыковую сварку сопротивлением. В 1887 г. русский изобретатель Н. Н. Бенардос запатентовал способы точечной и позднее шовной контактной сварки между угольными электродами. Позднее эти способы, усовершенствованные применением электродов из меди и ее сплавов, стали наиболее широко распространенными способами контактной сварки.

Особенность контактной сварки – значительная скорость нагрева, для чего необходимы сварочные машины большой электрической мощности. Поэтому развитие контактной сварки находилось в прямой зависимости от развития энергетики.

Контактная сварка прочно занимает первое место среди механизированных способов сварки (свыше 50 % по приведенной трудоемкости). Область применения контактной сварки очень широкая [1].

В автомобилестроении контактная сварка – основной способ соединения тонколистовых штампованных конструкций. Кузов современного легкового автомобиля сварен более чем в 10 тыс. точках. При производстве современных авиационных лайнеров

число сварных точек уже достигает нескольких миллионов. Современный железнодорожный пассажирский вагон – цельносварная конструкция, сваренная в 30 тыс. точках.

Стыки железнодорожных рельсов на основных магистралях сваривают стыковой контактной сваркой. Этот же способ используют для сварки поперечных швов магистральных трубопроводов на мощных стыковых машинах. Контактную сварку используют для сварки широкой номенклатуры сталей, различных алюминиевых и магниевых сплавов и сплавов на основе других металлов.

В строительной индустрии контактную сварку применяют для сварки арматурной сетки. В радиотехнической и электронной промышленности и приборостроении широко распространена контактная и ультразвуковая микросварка.

На заре развития контактной сварки ее использовали, как процесс, заменяющий клепку и пайку. Сейчас же, не применяя этот способ, невозможно создать современную металлическую конструкцию [1].

Контактная сварка характеризуется высокой производительностью, позволяет уменьшать остаточные деформации, в ряде случаев снижает расход энергии, не требует применения присадочных материалов и флюсов. Кроме того, отсутствует необходимость в специальных вентиляционных устройствах. Контактные машины можно размещать в производственных потоках вместе с оборудованием другого типа, они имеют высокий уровень механизации и автоматизации.

Развитие контактной сварки в значительной степени зависит от развития электротехнического машиностроения. Современная машина для контактной сварки представляет собой сложный агрегат, сочетающий механические, пневматические, электротехнические и электронно-ионные узлы и аппаратуру.

С каждым годом совершенствуется сварочное оборудование. Промышленность выпускает универсальное и специализированное оборудование различного назначения широкой номенклатуры. Появились высокопроизводительные точечные машины, позволяющие получать до 500 сварных соединений в минуту, специальные машины для сварки легированных сталей и сплавов.

Распространено применение специализированных многоэлектродных машин, в которых как бы объединены в одном агрегате десятки или даже сотни одноточечных машин.

Большие достижения имеются в области комплексной механизации и автоматизации. Созданы высокопроизводительные поточные и автоматические линии сборки узлов автомобилей, отопительных радиаторов, элементов приборов и радиосхем. Применяются промышленные роботы.

Одна из важнейших задач сварочного производства – это дальнейшая механизация и автоматизация. Контактная сварка, самый распространенный механизированный способ сварки, будет развиваться ускоренными темпами. Рост специализации способствует развитию массового производства, для которого будет все больше требоваться специализированных контактных машин и автоматических линий на их основе. Планируется значительное увеличение производства этого типа оборудования.

Новые контактные машины должны иметь улучшенные энергетические характеристики и обладать надежностью в эксплуатации. Предстоит усовершенствовать электронное управление сварочных машин с использованием интегральных схем. В специальных контактных машинах и автоматических линиях найдут применение управляющие ЭВМ. Будет продолжаться разработка рациональной технологии сварки новых материалов и значительно расширяться работы по улучшению качества сварки [1].

1. ОБРАЗОВАНИЕ СОЕДИНЕНИЙ КОНТАКТНОЙ СВАРКОЙ

1.1. Общие сведения

1.1.1. Сущность контактной сварки

Контактная сварка – это процесс образования неразъемных соединений конструкционных металлов в результате их кратковременного нагрева электрическим током и пластического деформирования усилием сжатия.

Соединение свариваемых деталей при контактной сварке (как и при других способах сварки) происходит путем образования связей между атомными агрегатами в зоне контакта этих деталей.

Для образования физического контакта и активации соединяемых поверхностей затрачивается тепловая и механическая энергия, подводимая извне.

Так как образование соединения происходит в зоне контакта свариваемых деталей, то этот способ сварки получил название контактной.

Образование сварных соединений происходит в условиях быстро меняющихся электрических и температурных полей при высоких скоростях нагрева и пластических деформаций.

Свариваемые детали нагреваются проходящим через них электрическим током, за счет собственного сопротивления самих деталей и контакта между ними и электродами, подводящие электрический ток [1, 2, 6].

1.1.2. Способы контактной сварки

По технологическому приему получения соединений различают: *точечную, рельефную, шовную и стыковую сварку.*

Процесс *точечной, рельефной и шовной* сварки протекает практически по единой схеме и характерен малым временем (0,1-1 сек.), большими значениями сварочного тока (3-300 кА) и усилия сжатия деталей со стороны электродов (100-1000 кгс). Необходимым условием формирования соединения является образо-

вание общей зоны расплавленного металла заданных размеров, что обеспечивает прочность и герметичность соединения.

Образование соединения при *стыковой сварке* происходит в процессе совместной пластической деформации нагретых электрическим током торцов деталей при осадке.

Точечная сварка

Способ контактной сварки, при котором детали свариваются по отдельным ограниченным участкам касания (по ряду точек).

Детали собираются внахлестку (рис.1.1), сжимают усилием *Fсв* электродами, к которым подключен источник электрической энергии (например, сварочный трансформатор).

Детали нагреваются при кратковременном прохождении сварочного тока *Iсв* до образования зоны взаимного расплавления деталей, называемой ядром.

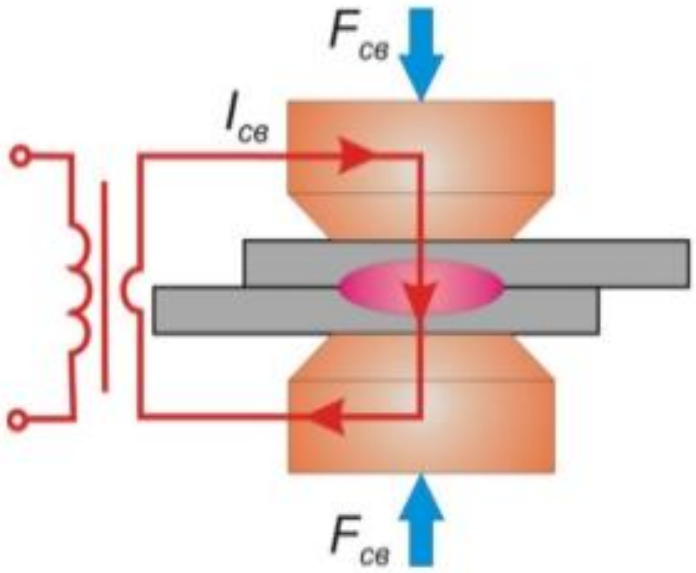


Рис. 1.1. Схема точечной сварки

Нагрев зоны сварки сопровождается пластической деформацией металла в зоне контакта деталей (вокруг ядра), где образуется уплотняющий поясок, надежно предохраняющий жидкий металл от выплеска и от окружающего воздуха. Поэтому специальной защиты зоны сварки не требуется.

После выключения тока расплавленный металл ядра быстро кристаллизуется и образуются металлические связи между соединяемыми деталями.

Образование соединения происходит с расплавлением металла.

Рельефная сварка

Разновидность точечной сварки (рис.1.2).

На поверхности одной из деталей предварительно формируют выступ – рельеф, который ограничивает начальную площадь контакта деталей, в результате чего при сварке в этой зоне повышаются плотность тока и скорость тепловыделения.

Детали нагреваются при кратковременном прохождении сварочного тока *Iсв*.

При нагреве рельеф постепенно деформируется; на определенной стадии процесса сварки формируется ядро, как при обычной точечной сварке.

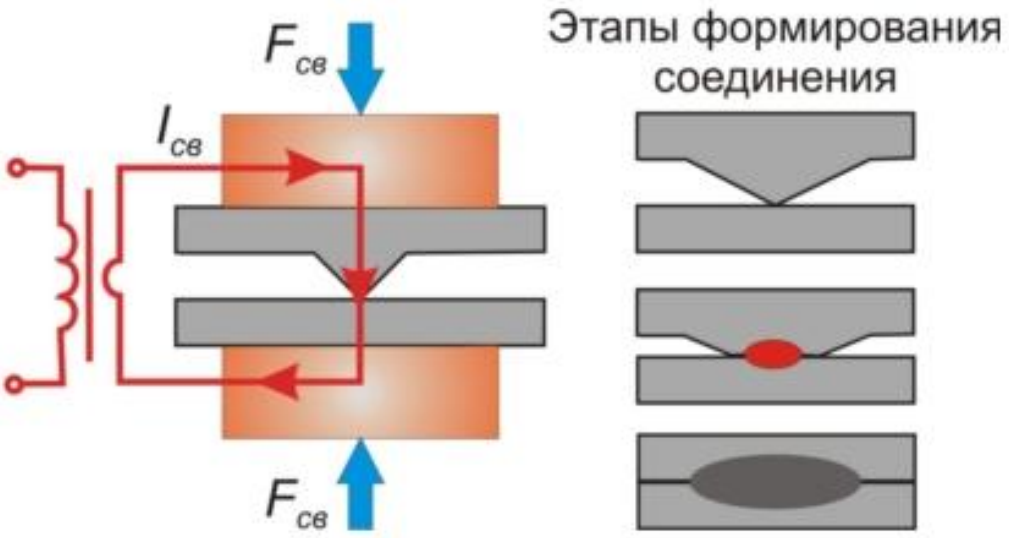


Рис. 1.2. Схема рельефной сварки

Шовная сварка

Способ получения герметичного соединения (шва) путем образования ряда перекрывающихся точек (рис. 1.3).

Подвод тока и перемещение деталей осуществляют с помощью вращающихся дисковых электродов – *роликов*.

Как и при точечной сварке, детали собирают внахлестку и нагревают кратковременными импульсами сварочного тока.

Перекрытие точек достигается соответствующим выбором паузы между импульсами тока и скорости вращения роликов [1, 2, 6].

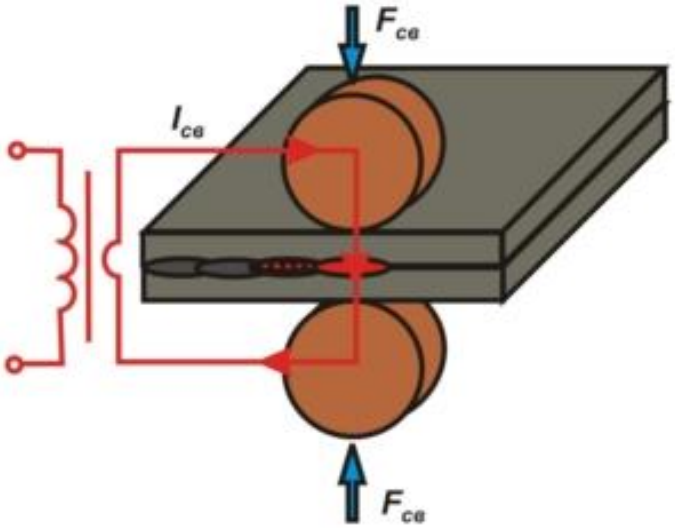


Рис. 1.3. Схема шовной сварки

Стыковая сварка

Способ контактной сварки, когда детали соединяются по всей площади касания (по всему сечению).

Детали закрепляют в токоподводящих зажимах, один из которых, как правило правый, подвижный и соединен с приводом усилия сжатия машины (рис. 1.4).

По степени нагрева металла торцов деталей различают стыковую сварку *сопротивлением и оплавлением*.

При стыковой сварке сопротивлением детали предварительно сжимают усилием *F* и включают в сеть сварочный трансформатор. По деталям протекает сварочный ток *Iсв*, и происходит постепенный нагрев стыка деталей до температуры, близкой к температуре плавления. Затем сварочный ток выключают и резко увеличивают усилие осадки деталей, которые деформируются в стыке. При этом из зоны сварки частично выдавливаются поверхностные плёнки, формируется физический контакт, и образуется соединение.

При стыковой сварке оплавлением вначале на детали подают напряжение от сварочного трансформатора, а затем их сближают. При соприкосновении деталей в отдельных контактах вследствие большой плотности тока металл контактов быстро нагревается и взрывоопасно разрушается.

Нагрев торцов деталей происходит за счёт непрерывного образования и разрушения контактов – перемычек, т.е. оплавле-

ния торцов. К концу процесса на торцах образуется сплошной слой жидкого металла. В этот момент резко увеличивают скорость сближения и усилие осадки деталей; торцы смыкаются, большая часть жидкого металла вместе с поверхностными плёнками и частью твёрдого металла выдавливается из зоны сварки, образуя утолщение – грат.

Стыковую сварку, как сопротивлением, так и оплавлением относят по состоянию металла в зоне сварки к сварке в твердом состоянии, хотя в отдельных случаях, особенно при стыковой сварке оплавлением деталей больших сечений, стыковое соединение формируется в твердожидкой фазе.

Образование соединения происходит с расплавлением металла [14].

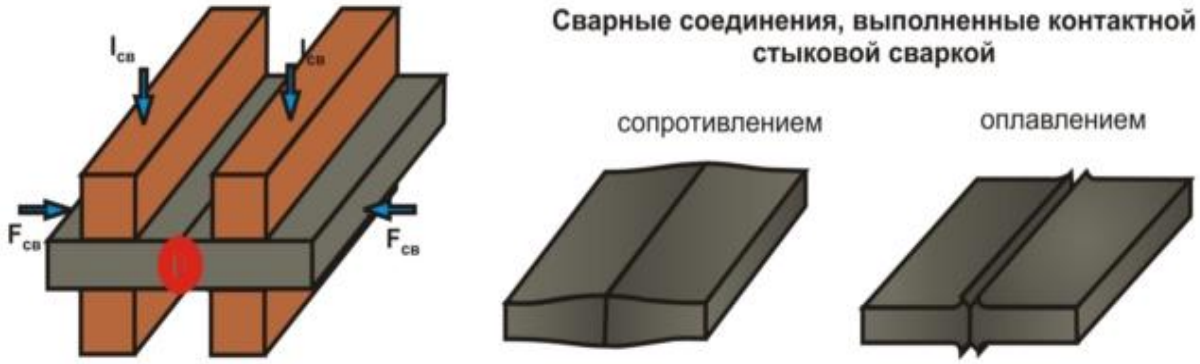


Рис. 1.4. Схема стыковой сварки

1.1.3. Общая схема формирования соединений при контактной сварке

Процесс ***точечной, шовной и рельефной сварки*** характерен весьма малым временем сварки ($t_{св}$) при больших сварочных токах ($I_{св}$) и усилиях ($F_{св}$), обеспечивающих локальное плавление металла. Необходимым условием формирования соединения является образование общей зоны расплавленного металла заданных размеров, что обеспечивает прочность и герметичность соединения.

При рассматриваемых способах сварки образование соединения происходит в значительной мере по единой схеме, состоящей из трех этапов I-III (рис. 1.5).

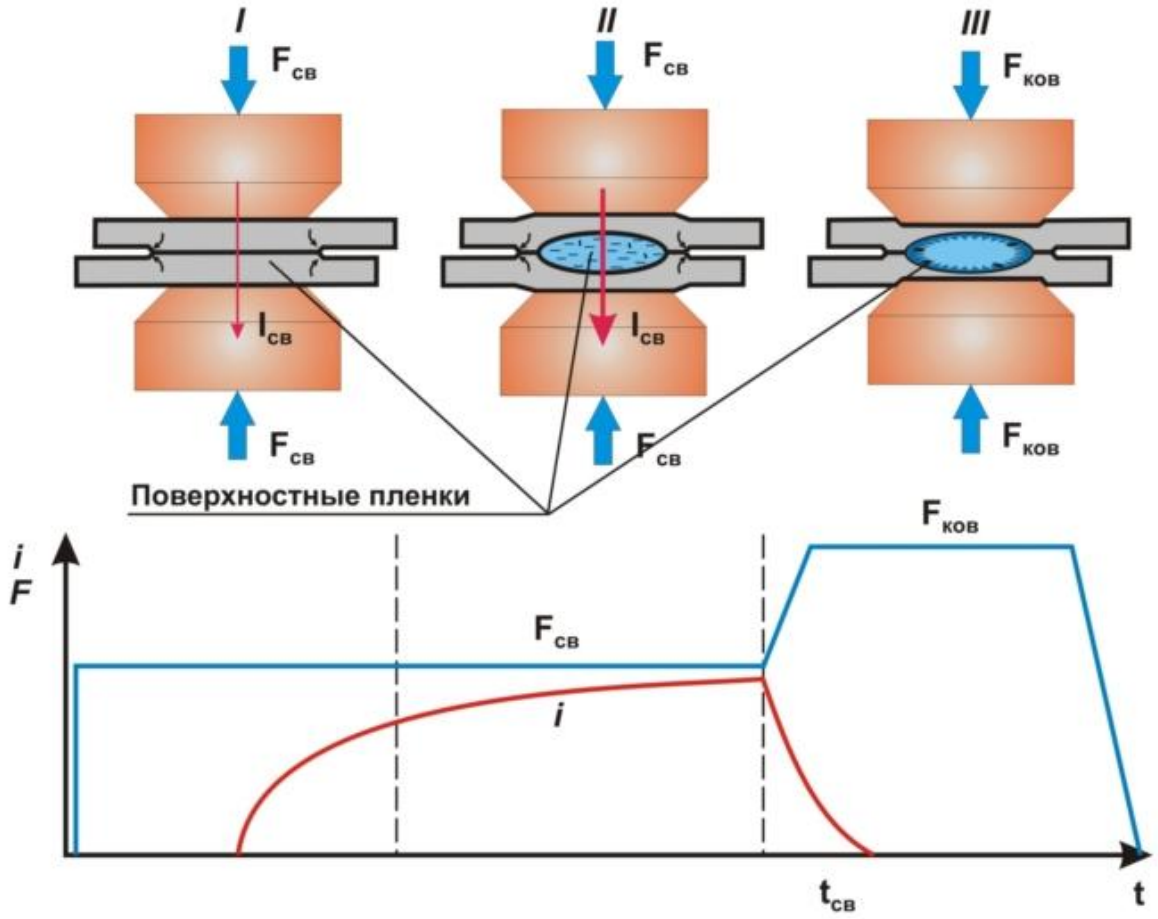


Рис.1.5. Этапы образования сварного соединения точечной сваркой

Первый этап начинается с момента обжатия деталей, вызывающего пластическую деформацию микронеровностей в контактах электрод-деталь и деталь-деталь. Последующее включение тока и нагрев металла облегчают выравнивание микрорельефа, разрушение поверхностей пленок и формирование электрического контакта. При рельефной сварке на данном этапе начинается осадка рельефа. Нагретый металл деформируется преимущественно в зазор между деталями, и образуется уплотняющий поясок.

Второй этап характеризуется расплавлением металла и образованием ядра. По мере прохождения тока ядро растет до максимальных размеров – по высоте и диаметру. При этом происходит перемешивание металла, удаление поверхностных пленок и образование металлических связей в жидкой фазе. Продолжается процесс пластической деформации и тепловое расширение металла. К концу этого этапа отмечается почти полная осадка рельефа.

Третий этап начинается с выключения тока, сопровождающегося охлаждением и кристаллизацией металла. Образуется общее для деталей литое ядро. При охлаждении уменьшается объем металла, и возникают остаточные напряжения. Для снижения уровня этих напряжений и предотвращения усадочных трещин и раковин требуются значительные усилия.

Для получения следующего соединения цикл через определенную паузу вновь повторяется.

При шовной сварке за счет теплопередачи от предыдущих точек процессы пластической деформации при сварке второй и последующих точек на всех трех этапах облегчаются. Снижается также скорость кристаллизации ядра, что приводит к уменьшению остаточных напряжений [1, 2, 6].

Образование соединения при ***стыковой сварке*** происходит в процессе совместной пластической деформации нагретых электрическим током торцов деталей при осадке. Стыковая сварка сопротивлением и оплавлением происходит практически по единой схеме и состоит из двух этапов – нагрева торцов деталей и осадки (рис. 1.6). Однако условия образования межатомных связей, определяемые состоянием поверхностей, для методов сварки сопротивлением и оплавлением различны.

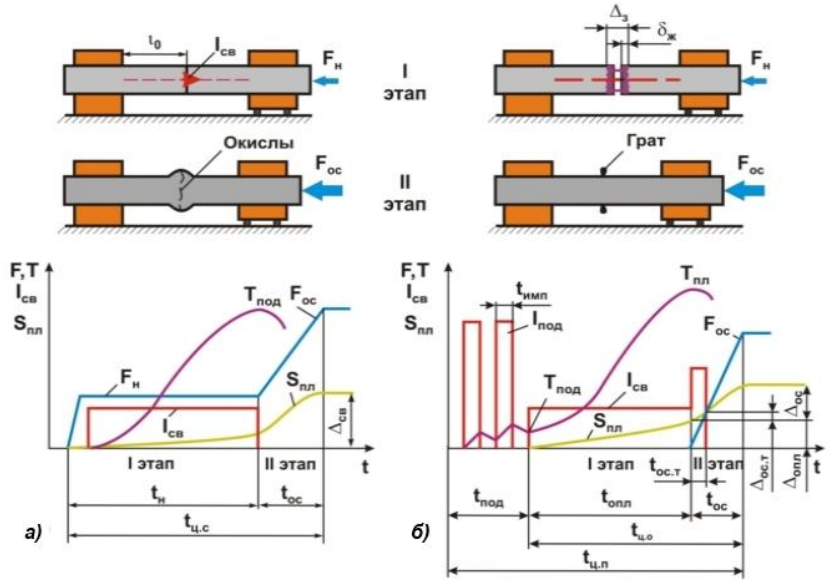


Рис.1.6. Этапы образования соединений и типовые циклограммы процесса контактной сварки:
а – стыковая сопротивлением и *б* – оплавлением

На рис. 1.6 $F_н$, $F_{св}$, $F_{ков}$, $F_{ос}$ – начальное, сварочное, ковочное и усилие осадки; $I_{св}$, $I_{под}$ – сварочный и ток подогрева; $S_п$ – перемещение подвижной плиты машины; $\Delta_{св}$, $\Delta_{ос}$, $\Delta_{ос.т}$ – общая деформация деталей при сварке, осадке и осадке под током; $\Delta_{опл}$ – укорочение деталей при оплавлении; $t_{св}$, $t_н$, $t_{ос}$, $t_{ос.т}$, $t_{под}$, $t_{опл}$, $t_{ц.с}$, $t_{ц.о}$, $t_{ц.п}$ – время сварки, нагрева, осадки, осадки под током, подогрева, оплавления, цикл сварки, цикл оплавления, сварки оплавления с подогревом.

Первый этап при стыковой сварке сопротивлением (рис.1.6, *а*) в значительной мере аналогичен процессам, протекающим до образования расплавления в контакте деталь-деталь при точечной сварке. Детали входят в соприкосновение при начальном сжимающем усилии $F_н$ и торцы интенсивно нагреваются до температуры $(0{,}8\text{-}0{,}9)T_{пл}$ при прохождении сварочного тока.

Второй этап характеризуется пластическим деформированием металла, в результате которого происходит частичное выдавливание оксидных пленок с торцевой поверхности при значительном усилии осадки. Термическая активность атомов в этот момент способствует образованию активных центров взаимодействия и окончательному формированию металлических связей в ходе совместной пластической деформации металла в твердой фазе. Однако относительно малая деформация не обеспечивает полного удаления оксидов.

При стыковой сварке оплавлением (рис.1.6, *б*) нагрев деталей происходит до образования на торцах слоя расплавленного металла толщиной $\delta_ж$ в результате локального расплавления и разрушения перемычек. Второй этап сопровождается деформацией нагретых поверхностей – осадкой.

При сварке оплавлением оксиды находятся на поверхности тонкого слоя расплавленного металла. При сближении деталей они вместе с расплавом вытесняются в грат. Формирование связей происходит в жидком и частично в твердом состоянии.

При сварке деталей большого сечения применяют предварительный подогрев торцов за счет, например, возвратно-поступательного перемещения подвижной плиты машины. При сближении деталей цепь замыкается накоротко, и создается некоторое давление. Электрический ток подогревает детали. Нагрев

отдельными импульсами $t_{имп}$ способствует более равномерному нагреву торцов деталей [1, 2, 6].

1.1.4. Процессы, протекающие при контактной сварке

Процесс образования сварного соединения сопровождается протеканием основных физических процессов, которые вызывают рад сопутствующих. Основные и сопутствующие процессы, протекающие в зоне сварки, можно представить следующим образом:

Однако все они имеют общую основу.

При одном из типовых электротермодеформационном цикле точечной сварки на первом этапе сопутствующие процессы ввиду относительно малой деформации и низкой температуры зоны сварки не получают большого развития.

При появлении на втором этапе расплавленного ядра резко возрастает тепловое расширение металла, появляется опасность выплеска, вследствие теплопроводности отмечается нагрев околошовной зоны, изменение исходной структуры металла, массоперенос в контакте электрод-деталь.

На третьем этапе при охлаждении металла происходит кристаллизация металла ядра, образование литой структуры и значительных остаточных напряжений, продолжается теплопередача в околошовную зону и изменение структуры металла в этой части соединения.

Степень развития сопутствующих процессов и изменения первоначальных свойств металла может быть уменьшена, например, за счет уменьшения скорости нагрева (роста сварочного тока) и увеличения усилия на стадии охлаждения.

При *стыковой сварке* процессы теплового расширения металла и массоперенос в контакте электрод-деталь мало характерны и не оказывают существенного влияния на качество соединений.

Обеспечение высокого качества сварки и максимальной производительности процесса для заданной толщины, формы и материала изделия определяется правильностью выбранного режима сварки.

Режим сварки – совокупность электрических, механических и временных параметров, обеспечиваемых сварочным оборудованием для получения качественного соединения.

Кроме того, качество соединений зависит от техники сварки, формы электродов, качества сборки и подготовки поверхности, сварочного оборудования, системы контроля и от других конструктивно-технологических факторов [1, 2, 6].

1.1.5. Преимущества и область применения контактной сварки

В настоящее время контактная сварка – один из ведущих способов получения неразъемных соединений деталей в различных отраслях техники.

Широкое применение различных способов контактной сварки обусловлено следующими ее ***основными достоинствами***:

1. Широкой возможностью автоматизации сборочно-сварочных работ. Среди механизированных и автоматизированных способов сварки контактная сварка занимает первое место.

2. Высоким и стабильным качеством сварки, не зависящим от квалификации оператора-сварщика.

3. Отсутствием потребности в специальных технологических материалов (присадочная проволока, флюс, защитные газы и т.д.).

4. Широким классом свариваемых материалов. Контактной сваркой можно успешно соединять практически все известные конструкционные материалы – низкоуглеродистые и легированные стали, жаропрочные и коррозионно-стойкие сплавы, сплавы на основе алюминия, магния, титана и д.р.

5. Относительно высокой культурой производства и благоприятными условиями труда.

Область применения контактной сварки чрезвычайно широка – от крупногабаритных строительных конструкций, космических аппаратов до миниатюрных полупроводниковых устройств и плёночных микросхем.

Широкое применение контактная сварка нашла в авиа, судо- и автостроении, вагоностроении, сельхозмашиностроении, сварки трубопроводов и рельс и др.

По имеющимся данным, в настоящее время около 30 % всех сварных соединений выполняют различными способами контактной сварки. Максимальный объем (около 80 %) приходится на точечную сварку, 10 % – на стыковую, 7 % – шовную и около 3 % – на рельефную [1, 2, 6].

1.1.6. Технико-экономические показатели

Основные технико-экономические показатели, характеризующие эффективность использования различных способов контактной сварки – трудоёмкость (производительность), металлоёмкость сварных узлов, затраты электроэнергии, электродные и другие вспомогательные материалы, себестоимость.

Трудоёмкость определяется затратами на сварочную операцию – штучным временем:

$$t_{шт} = t_м + t_в + t_{пр} + t_п \,, \qquad (1.1)$$

где $t_м$ – машинное или основное технологическое время, зависящее от режима сварки; $t_в$ – вспомогательное время, расходуемое на установку, зажатие и съём детали, её перемещение, зачистку электродов и т.п.; доля $t_в$ в штучном времени достигает 80 % и зависит

от степени механизации вспомогательных операций, удобства подхода к изделию и т.д.; $t_{пр}$ – прибавочное время на техническое обслуживание оборудования (пуск и регулировка машин, уборку и т.п.) составляет 10–15 % ($t_м$ + $t_в$); $t_п$ – продолжительность естественных перерывов в работе и отдыха.

При нормировании всего технологического процесса следует также учитывать затраты на подготовку поверхности (до 20%), контроль (10–15 %) и операции по обработке узлов, например, снятие грата (10–15 %). Для контактной сварки характерно малое значение $t_{шт}$ и особенно $t_м$, что определяет высокую производительность этого процесса. Так, например, известны установки для одноточечной сварки сталей, позволяющие сваривать до 200 точек в минуту, высокопроизводительные многоточечные машины, автоматические линии высокочастотной сварки труб и профилей различного сечения со скоростью до 100 м/мин.

По сравнению с клёпкой точечная и шовная сварка лёгких сплавов обеспечивает повышение производительности в 3–4 раза и более, коррозийно-стойких сталей в 8–10 раз. Эффективно внедрение точечной сварки при изготовлении слоистых и сотовых панелей. Переход с дуговой на точечную сварку подобных узлов позволил снизить трудоёмкость производства в 5 раз. Значительная экономия времени достигается также при использовании стыковой сварки оплавлением взамен дуговой при сварке деталей больших сечений.

Зная штучное время, разряд работы, число одновременно занятых рабочих и тарифную сетку, можно найти денежное выражение трудоёмкости. Эти данные для всех видов контактной сварки приведены в соответствующих нормативах, действующих в каждой отрасли промышленности. Себестоимость изготовления всего сварного узла включает также затраты на электроэнергию, вспомогательные материалы, амортизацию оборудования и т.п. Относительно высокая трудоёмкость процесса контактной сварки определяет и низкую её себестоимость. Внедрение контактной сварки в различных отраслях промышленности в большинстве случаев обеспечивает значительную экономию металлов.

Контактная сварка – относительно энергоёмкий процесс. Удельные затраты энергии зависят от свариваемых металлов, размеров соединений (минимального диаметра ядра), режима

сварки, типа оборудования и т.п. Кроме того, для контактной сварки применяется оборудование большой мощности. Установочная мощность машин и затраты энергии можно снизить при использовании конденсаторных машин, уменьшенных размеров ядра, уменьшении площади вторичного контура машины (вылета электродов). Размеры контура легко регулируются на машинах с радиальным ходом электродов. Высокой экономичностью отличаются и машины для стыковой сварки с контурными или охватывающими трансформаторами [1, 2, 6].

К вспомогательным материалам обычно относятся электродные сплавы, вода для охлаждения токоведущей части и сжатый воздух. Потребление электродных материалов составляет в среднем 10–15 г на 1 000 точек при точечной сварке и 50–100 г на 100 м шва при шовной сварке. При этом большой расход электродов отмечается при сварке оцинкованных сталей и жаропрочных сплавов. Зажимные устройства при стыковой сварке рассчитаны на выполнение 20 000–100 000 стыков. Потребление электродных материалов может быть снижено при использовании рациональных режимов сварки, интенсивном охлаждении электродов, хорошей подготовке поверхности деталей, а также при применении материалов с высокой стойкостью.

Расход охлаждающей воды, например, для машин переменного тока составляет 300–1200 л/ч. С ростом мощности машин расход воды уменьшается. Экономия воды достигается при использовании замкнутой системы охлаждения за счёт снижения общих потерь в системе охлаждения.

Средний расход воздуха для машин с пневматическим приводом усилия при номинальных значениях ПВ составляет: для точечных машин мощностью до 100 и выше 100 кВА соответственно 20–23 и 30–60 $м^3$/ч, для шовных машин 10–12 $м^3$/ч и для стыковых машин 20 $м^3$/ч.

Высокие технико-экономические показатели контактной сварки по сравнению с другими способами получения неразъёмных соединений определяют постоянно возрастающую роль этого процесса особенно при массовом производстве сварных конструкций [1, 2, 6].

1.2. Источники тепла при контактной сварке

Нагрев и плавление металла происходят за счет выделения теплоты на электрических сопротивлениях при прохождении через них электрического тока. Полное количество теплоты, выделяемое между электродами за время сварки ($t_{св}$), определяется законом Джоуля-Ленца:

$$Q_{ээ} = \int_0^{t_{св}} i_{св}^2(t_{св}) r_{ээ}(t) dt, \qquad (1.2)$$

где $i_{св}(t)$ – мгновенное значение сварочного тока, меняющееся в процессе сварки; $r_{ээ}$ – общее сопротивление металла между электродами в момент времени $t \geq t_{св}$.

Величина $r_{ээ}$ и его распределение в зоне сварки зависит от способа сварки и существенно влияет на характер нагрева. При сварке двух деталей из одного и того же металла равной толщины (рис. 1.7):

$$r_{ээ} = 2r_{д} + 2r_{эд} + 2r_{дд}, \qquad (1.3)$$

где $r_{д}$ – собственное активное сопротивление свариваемых деталей; $r_{эд}$ – переходное сопротивление в приконтактной зоне детали с электродом; $r_{дд}$ – сопротивление на участке контакта двух деталей.

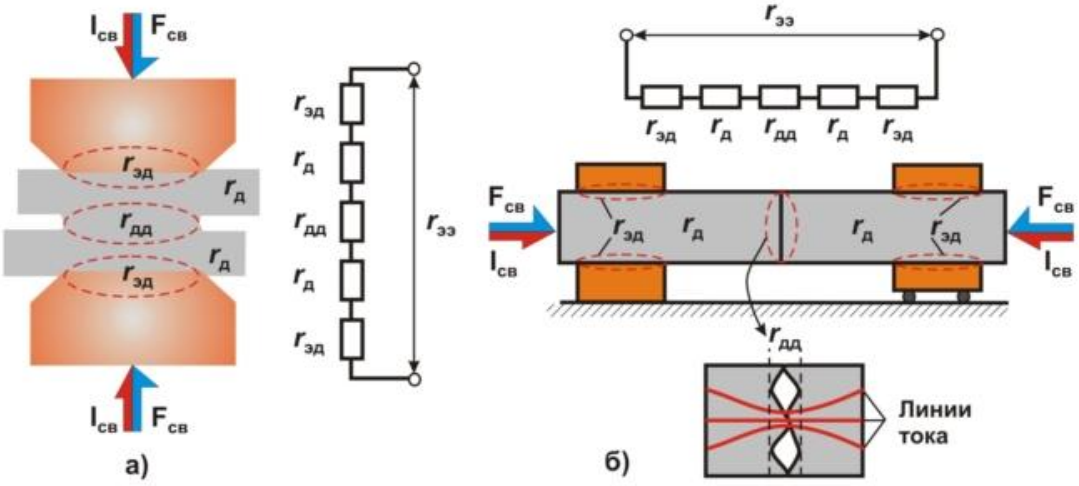


Рис. 1.7. Распределение электрического сопротивления зоны сварки при: *а* – точечной; *б* – стыковой сварке

Сопротивления на участке контакта электрод-деталь и деталь-деталь называют контактным сопротивлением $r_к$:

$$r_к=2r_{эд}+2r_{дд}, \qquad (1.4)$$

При стыковой сварке контактное сопротивление $r_{эд}$ при расчетах обычно не учитывают, т.к. площадь контакта велика и находится в дали от зоны сварки, тепло отводится в массивные охлаждаемые губки и не оказывает существенного влияния на нагрев свариваемых деталей.

Нагрев деталей в процессе сварки можно рассматривать как действие двух источников: объемного – теплоты выделяемой за счет собственного сопротивления деталей и равномерно распределенной по объему; и плоского – теплоты выделяемой на контактном сопротивлении. Поэтому зависимость (1.2.) можно представить в следующем виде:

$$Q_{ээ}=\int_0^{t_{св}} i_{св}^2(t_{св})r_d(t)dt+\int_0^{t_{св}} i_{св}^2(t_{св})r_к(t)dt, \qquad (1.5)$$

Отдельные составляющие электрического сопротивления $r_{ээ}$ необходимо рассматривать при холодных деталях (до включения сварочного тока) и деталей в нагретом состоянии при протекании через них сварочного тока [1, 2, 6].

Разделение сварочного контакта на зоны весьма условно, т.к. электрические и температурные поля в них взаимосвязаны.

1.2.1. Сопротивление контактов твердых деталей

Сопротивления, сосредоточенные в узкой области контактов деталь – деталь и электрод – деталь называют контактными сопротивлениями.

Наличие контактных сопротивлений можно обнаружить, если через металлические детали, сжатые усилием F, пропустить небольшой ток и измерить падение напряжения на участках равной длины в области контакта и самих деталей (рис. 1.8). При этом $\Delta u_{дд}>\Delta u_д$ ($>\Delta u_д=Ir$). При холодных деталях $r_к$ обычно составляет значительную часть от $r_{ээ}$. Поэтому, например, для оценки

качества состояния поверхности деталей измеряют $r_{ээ}$ и условно отождествляют его со значением $r_к$.

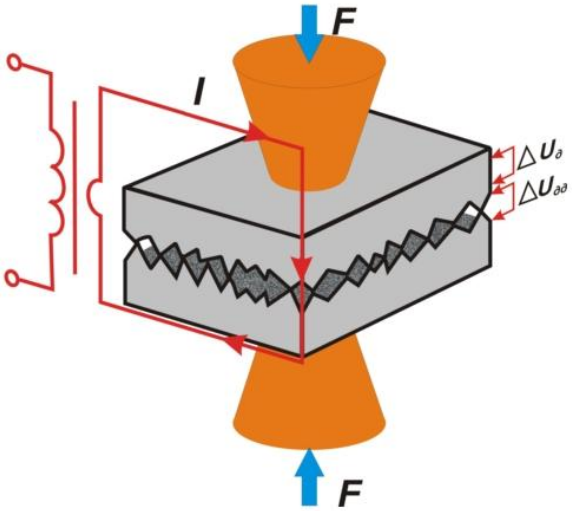


Рис. 1.8. Контактное сопротивление при точечной сварке

Наличие контактных сопротивлений связано с ограниченностью площади электрического контакта из-за неровной поверхности деталей и электродов, а также из-за различных неэлектропроводимых поверхностных образований: оксидных и гидроксидных пленок, адсорбированной влаги, масел, продуктов коррозии, пыли и т.п. Поэтому фактическая площадь контакта ($S_ф$) до нагрева деталей значительно меньше контурной площади контакта. При точечной и шовной сварке контурная площадь контакта определяется диаметром электрода $d_э$ или диаметром пластического пояска d_n; при рельефной – сечением рельефа; при стыковой – сечением свариваемых деталей.

В этих условиях происходит сгущение силовых линий тока на отдельных электропроводных микровыступах. Такой «ситовый» характер проводимости приводит к резкому увеличению плотности тока и интенсивному тепловыделению в зоне контакта.

Величина и характер изменения контактного сопротивления зависит от следующих *факторов*:

1) состояния поверхности детали;
2) усилия сжатия деталей;
3) рода материала;
4) температуры в зоне контакта.

Влияние состояния поверхности деталей на контактное сопротивление очень велико. В табл. 1.1 приведены результаты измерения контактного сопротивления двух различно обработанных пластин из низкоуглеродистой стали толщиной 3 мм, сжатых электродами ($d_э$=10мм) с усилием 200 даН [1].

Таблица 1.1

Зависимость $r_к$ от степени обработки поверхности контактируемых материалов

Степень обработки поверхности	**$r_к$, мкОМ**
образцы очищенные наждачным кругом и шлифованные	100
травленные образцы	300
обработанных резцом	1200
необработанные, покрытые окалиной	80000
необработанные, покрытые ржавчиной и окалиной	300000

При увеличении усилия сжатия деталей контактное сопротивление уменьшается (рис. 1.9), т.к. увеличивается фактическая площадь контактирования деталей $S_ф$ за счет смятия микровыступов, увеличения их числа и разрушения поверхностных пленок.

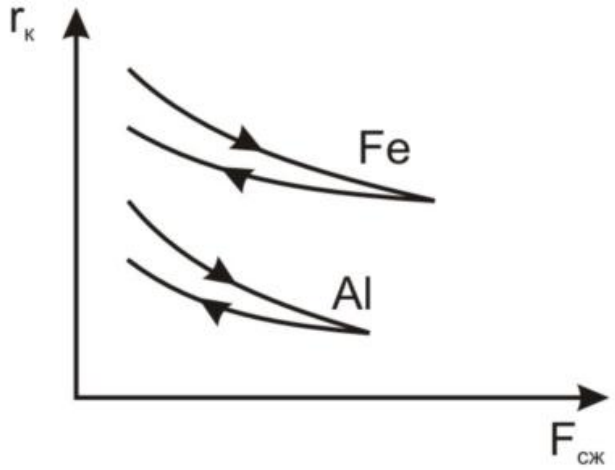


Рис. 1.9. Зависимость контактного сопротивления от усилия сжатия деталей

Гистерезис при снятии $F_{сж}$ объясняется пластическим деформированием микровыступов и необратимым разрушением окисных пленок.

Зависимость контактных сопротивлений холодных деталей от усилия сжатия можно оценить по эмпирической зависимости:

$$r_к = \frac{r_{к0}}{F_{сж}^{\alpha}}, \qquad (1.6)$$

где $r_{к0}$ – значение контактного сопротивления при $F_{сж}$ = 1 кгс, равный для стали $(5–6)10^{-3}$ и алюминиевых сплавов $(1–2)10^{-3}$; α – показатель степени, равный для стали 0,7 и алюминиевых сплавов 0,8.

Приведенная зависимость не учитывает состояния поверхности деталей, составлена в предположении, что $r_к$ не зависит от размеров деталей и может служить лишь для ориентировочных расчетов.

Зависимость контактного сопротивления от рода материала определяется в основном твердостью контактируемых материалов. При постоянном усилии деформирование микрорельефа выше в мягком материале. Так, в контакте твердого металла с электродом из мягкого сплава $S_ф$ больше, а $r_{эд}$ меньше, чем в контакте свариваемых деталей, где $S_ф$ меньше, а $r_{дд}$ больше. При обжатии хорошо очищенных деталей из низкоуглеродистой стали электродами с высокой электропроводимостью принимают $r_{эд} \leq 0{,}5 r_{дд}$.

После включения сварочного тока микроконтакты быстро нагреваются, снижается сопротивление металла пластической деформации, облегчаются условия разрушения пленок, и ***при определенных критических температурах*** $T_{кр}$, характерных для данного металла, $r_к$ резко снижается до нуля (рис. 1.10). При этом $r_{ээ}$ определяется в основном сопротивлением самих деталей. Значения $T_{кр}$ для сталей составляют 600–700 °С, алюминиевых сплавов 400–450 °С. При увеличении $F_{св}$ $T_{кр}$ несколько снижается.

Снижение $r_к$ от момента контакта и до исчезновения достигается за время $(1–3)\cdot10^{-3}$ с. для сталей и $(5–6)\cdot10^{-3}$ с. для алюминиевых сплавов.

Экспериментально показано, что доля теплоты, выделяемой на сопротивлении $r_к$, обычно (при сварке деталей толщиной не более 1 мм) не превышает 5% общей энергии, генерируемой в зоне сварки. Несмотря на то, что $r_к$ существует относительно ко-

роткое время, оно может оказать влияние на последующий нагрев, особенно при сварке деталей малых толщин, где высота микрорельефа поверхности соизмерима с толщиной деталей. Первоначально нагретая зона контакта, обладающая повышенным сопротивлением, способствует большему тепловыделению. Однако при увеличении $r_{\partial\partial}$ стабильность тепловыделения мала, а с ростом $r_{э\partial}$ снижается стойкость электродов.

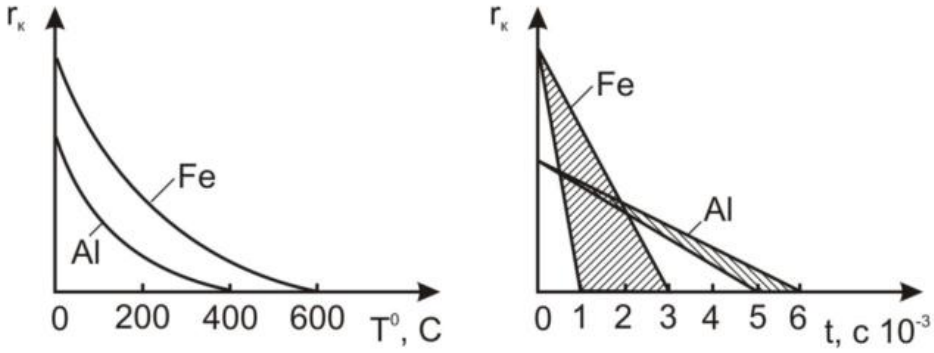


Рис. 1.10. Зависимость снижения контактного сопротивления в процессе нагрева

Для стабилизации тепловыделения, размеров соединений и стойкости электродов перед сваркой выполняют подготовку поверхностей деталей с целью удаления толстых поверхностных пленок и загрязнений, обеспечивая тем самым достаточно низкие и стабильные значения контактных сопротивлений. Для этих же целей часто рекомендуется применение повышенных сварочных усилий [1, 2, 6].

1.2.2. Сопротивление жидкого контакта

При стыковой сварке оплавлением, контакт между деталями осуществляется перемычками жидкого металла, его сопротивление определяется количеством и сечением одновременно существующих перемычек.

Количество перемычек, существующих одновременно, тем больше, чем больше сечение свариваемых деталей, скорость оплавления и плотность тока при оплавлении. Сечение перемычек тем больше, чем больше скорость оплавления.

В процессе образования и разрушения перемычек, электрическое сопротивление контакта изменяется от минимального (максимальное количество одновременно существующих перемычек) до бесконечности (все перемычки разрушены).

Значение контактного сопротивления при оплавлении можно определить по эмпирической зависимости:

$$r_{опл} = \frac{9500 \cdot \kappa_0}{F^{2/3} V_{опл}^{1/3} j_{опл}}, мкОм \qquad (1.7)$$

где F – сечение свариваемых деталей, см^2; $V_{опл}$ – скорость оплавления, см/с; $j_{опл}$ – плотность тока при оплавлении, А/мм$^{2;}$; κ_1 – коэффициент, учитывающий свойства оплавляемого материала (κ_1=1 – низколегированные, малоуглеродистые стали; κ_1 = 1,1 – аустенитные стали).

Среднее значение $r_{опл}$ при сварке сталей составляет 100÷1500 мкОм.

1.2.3. Собственное сопротивление деталей

Электрическое сопротивление холодных деталей при ***стыковой сварке*** определяется по формуле:

$$r_{д.хол} = \rho_0 \frac{l_0}{F}, \qquad (1.8)$$

где ρ_0 – удельное электрическое сопротивление детали, Ом·см; l_0 – расстояние от торца детали до контакта токопроводящей губки (установочная длина), см; F – площадь поперечного сечения детали, см^2.

При нагреве собственное сопротивление детали увеличивается, так как растет ρ_0. Удельное сопротивление при росте температуры увеличивается до среднего значения:

$$\rho_{Tср} = \rho_0 (1 + \alpha T_{ср}), \qquad (1.9)$$

где α – коэффициент температурного расширения; $T_{ср}$– средняя температура неравномерно нагретых деталей на длине l_0 (для

сварки сопротивлением $T_{ср}$=0,33$T_{св}$,; $T_{св}$= 1 200–1 300 °С, для сварки оплавлением $T_{ср}$=0,25$T_{пл}$).

Собственное сопротивление детали в горячем состоянии:

$$r_{д.гор} = \rho_0(1+\alpha T_{ср})\frac{l_0}{F}, \qquad (1.10)$$

При ***точечной и шовной сварке*** электрический ток к холодной детали толщиной δ_0 подводится через два контакта диаметром d_0 (рис. 1.11). Линии тока за счет шунтирования тока в металл располагаются не в объеме столба детали, ограниченного диаметром d_0, а растекаются по объему, условно ограниченному линиями, проведенными под углом 45° от границы контакта. Поэтому сопротивление детали $r_д$ будет меньше сопротивления столбика металла $r_ц$ длиной δ_0 и диаметром d_0. Тогда $r_д$=$Ar_ц$. Коэффициент A зависит от степени растекания тока.

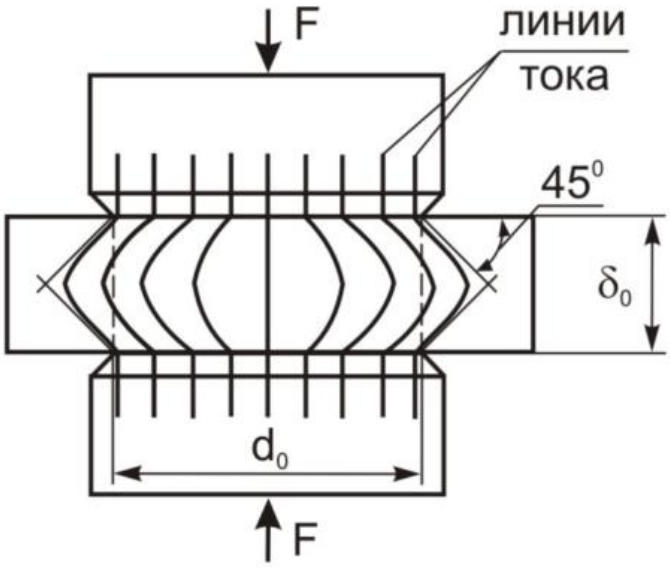


Рис. 1.11. Распределение линий тока по толщине детали при точечной сварке

Степень растекания тока тем больше, чем меньше отношение d_0/δ_0.

С уменьшением толщины δ_0 растекание тока уменьшается и $r_д$ приближается к $r_ц$. Экспериментальная зависимость $A=f(d_0/\delta_0)$ представлена на рис. 1.12.

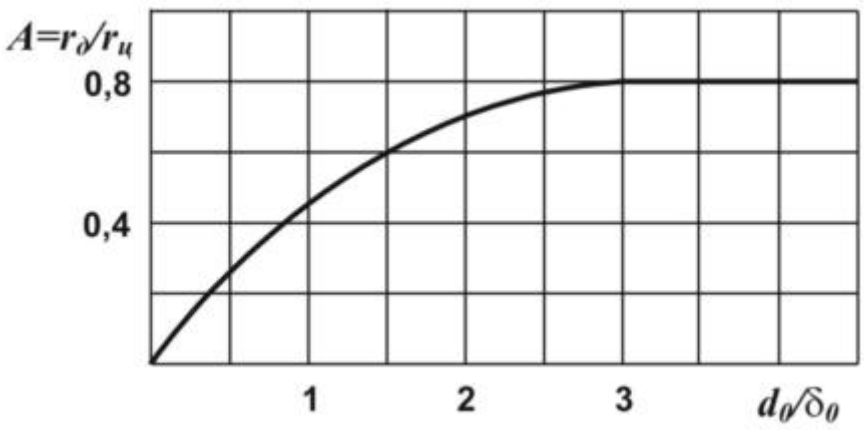


Рис. 1.12. Зависимость коэффициента A от отношения d_0/δ_0

Таким образом, собственное сопротивление детали можно определить:

$$r_д = A \cdot \rho_0 \frac{4\delta_0}{\pi d_0^2}, \qquad (1.11)$$

Однако в условиях контактной сварки поле линий тока отличается от рассмотренного случая, так как диаметр контакта электрод – деталь и деталь – деталь не равны. Кроме того, детали неравномерно нагреты по толщине. Их температуры непрерывно меняются по мере увеличения времени прохождения тока.

Ток к пластинке подводится через два неравных по диаметру контакта: первый из них равен диаметру электрода $d_э$, другой – диаметру контакта между деталями $d_к$ (рис.1.13).

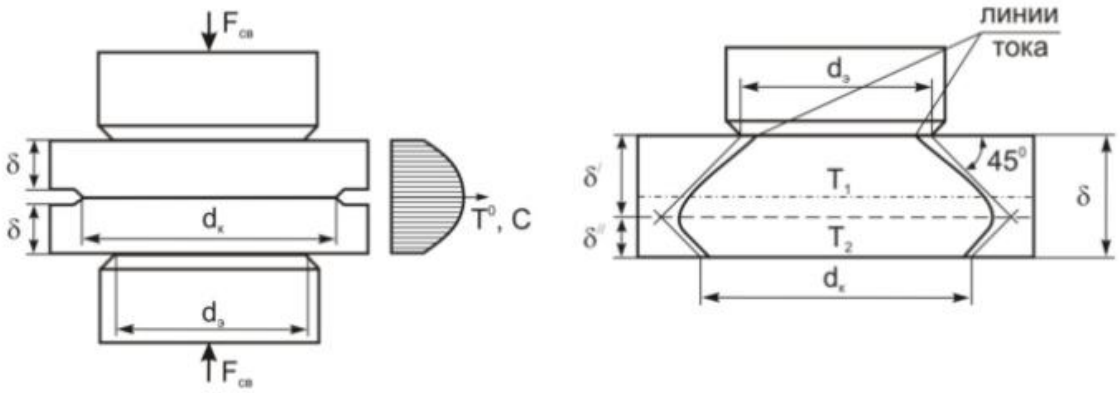


Рис. 1.13. Схема поля тока в свариваемой детали (для стали T_1 = 1200 °C, T_2 = 1500 °C)

Диаметр контактной поверхности электрода зависит от толщины свариваемых деталей и определяется:

$$d_э = 2\delta + 3 \qquad \text{при } \delta < 2 \text{ мм}$$

$$d_э = 1{,}5\delta + 3 \qquad \text{при } \delta \geq 2 \text{ мм}$$

Диаметр контакта между деталями к концу нагрева $d_к = d_э + \alpha\delta$. Коэффициент α зависит от усилия сжатия. При сварки стали на мягких режимах (при относительно малом $F_{св}$) α=1,0; при сварки на жестких режимах (при большом $F_{св}$) α=1,5–1,7

При $d_к > d_э$ схема линий тока имеет несимметричную форм по толщине детали. Собственное электрическое сопротивление пластины $r_д$ толщиной $\delta = \delta' + \delta''$, неравномерно нагретой в условиях контактной сварки с контактами неодинакового диаметра, можно рассматривать как сумму сопротивлений двух пластинок толщинами δ' и δ'':

$$r_{д.гор} = A_1 \cdot k \cdot \rho_{T1} \frac{4\delta'}{\pi d_э^2} + A_2 \cdot k \cdot \rho_{T2} \frac{4\delta''}{\pi d_к^2}, \qquad (1.12)$$

где k – коэффициент, учитывающий неравномерность нагрева детали (для стали принимается 0,8 и 0,9 для алюминиевых сплавов).

При условной схеме термодеформационного цикла сварки когда $d_к = d_э$:

$$r_{д.гор} = \frac{4Ak\delta(\rho_{T1} + \rho_{T2})}{\pi d_э^2}. \qquad (1.13)$$

1.2.4. Общее сопротивление зоны сварки

Сопротивление на участки электрической цепи между электродами при *точечной сварке* в начальный момент определяется в основном контактным сопротивлением (рис. 1.14). Собственное сопротивление холодных деталей относительно невелико. При дальнейшем нагреве контактные сопротивления резко снижаются, а собственное сопротивление деталей вначале растет вследствие увеличения удельного сопротивления ρ_0, а затем несколько

снижается в результате увеличения площади электрических контактов. Степень снижения сопротивления зависит от сжимающего усилия и с его повышением уменьшается. Общее сопротивление зоны сварки $r_{ээ}$ к концу нагрева определяется в основном собственным сопротивлением двух деталей.

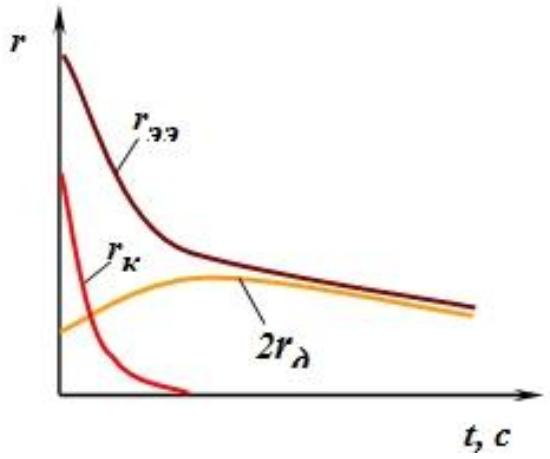


Рис. 1.14. Характер изменения электрических сопротивлений при точечной сварке

Основная доля тепла при точечной сварке выделяется в основном за счет собственного сопротивления деталей. Доля тепла, выделяемая на контактных сопротивлениях, не превышает 10 % в общем тепловом балансе. Однако, при сварке деталей малых толщин (до 1 мм) на жестких режимах (при кратковременном нагреве) роль контактных сопротивлений возрастает. Так при конденсаторной сварке основным источником тепла является контактное сопротивление, что дает возможность сваривать детали с разнотолщиностью 1:100 и выше [1, 2, 6].

1.3. Нагрев деталей при контактной сварке

1.3.1. Нагрев деталей при точечной, рельефной и шовной сварке

В условиях **точечной, шовной и рельефной сварки** выделение теплоты вызвано действием рядом источников. Основной источник – объемно распределенный с удельной мощностью $j^2\rho_t$ (j – плотность тока). Второстепенные – плоские ис-

точники с удельной мощностью $j^2 r_д / \pi d_k^2/4$ и $j^2 r_{эд} / \pi d_э^2/4$, связанные с генерированием теплоты на соответствующих контактных сопротивлениях. Доля плоских источников в общем тепловом балансе не превышает 10%.

Общая характеристика нагрева при этих способах сварки выражается формулой теплового баланса

$$Q_{ээ} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \qquad (1.14)$$

где $Q_{ээ}$ – общее количество теплоты, генерируемое в зоне сварки; Q_1 – количество теплоты, расходуемое на нагрев до температуры плавления ($T_{пл}$) столбика металла высотой 2δ и диаметром $d_э$ (рис. 1.15); Q_2 – количество теплоты, расходуемое на нагрев металла в виде кольца шириной x_2, окружающего ядро; Q_3 – количество теплоты, переданное в электроды за счет теплопроводности; Q_4 – потери тепла в атмосферу за счет радиационного и конвективного теплообмена с поверхности деталей и электродов.

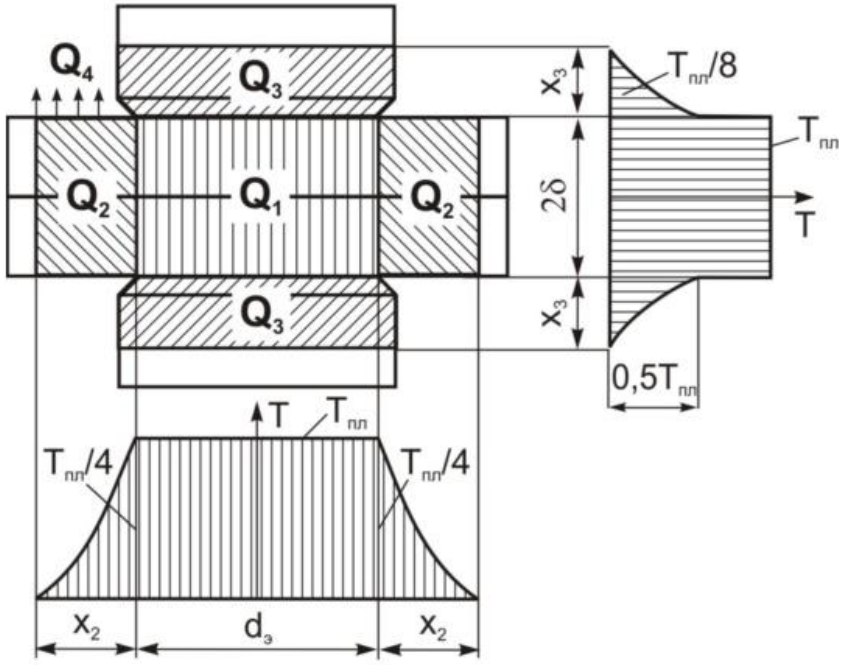


Рис. 1.15. Характер нагрева деталей одинаковой толщины при точечной сварке

К концу нагрева общее количество теплоты, затрачиваемое на образование сварной точки определяется законом Джоуля-Ленца: $Q_{ээ} = 2mI_{св}^2 R_{д.гор} t_{св}$.

Коэффициент m учитывает изменение сопротивления зоны сварки в процессе нагрева. При сварке малоуглеродистых сталей m принимают 1,0÷1,1; для алюминиевых и магниевых сплавов – 1,15; сталей аустенитного класса – 1,2; титановых сплавов – 1,4.

Количество тепла, расходуемое на нагрев условно выделенного центрального столбика до температуры плавления ($T_{пл}$), с учетом скрытой теплоты плавления, определяется по формуле:

$$Q_1 = \frac{\pi d_э^2}{4}(\delta_1 + \delta_2)c\gamma T_{пл}, Дж \qquad (1.15)$$

где $d_э$ – диаметр контактной поверхности электрода, см; δ_1 и δ_2 – толщины свариваемых деталей, см; c – удельная теплоемкость свариваемого металла, Дж/(г·К); γ – плотность свариваемого материала, г/см^3.

Теплота Q_2, расходуемая на нагрев прилегающей зоны металла, представляется в виде кольца шириной x_2, окружающего литое ядро, близкое по диаметру к $d_э$. Среднюю температуру кольца принимают равной четверти $T_{пл}$.

$$Q_2 = k_1\pi x_2(d_э + x_2)(\delta_1 + \delta_2)c\gamma\frac{T_{пл}}{4}, Дж \qquad (1.16)$$

где k_1 – коэффициент, учитывающий неравномерность нагрева кольца металла по толщине, т.к. наиболее нагретые участки расположены у внутренней поверхности кольца (k_1 = 0.8).

Потери тепла в электроды можно приближенно определить, принимая температуру на их контактной поверхности как $T_{эл}$ = 0,5$T_{пл}$. При этом средняя температура интенсивно нагреваемого участка электрода длиной x_3 принимается равной $T_{пл}$/8.

$$Q_3 = 2k_2\frac{\pi d_э^2}{4}x_0'C'\gamma'\frac{T_{пл}}{8}, Дж \qquad (1.17)$$

где k_2 – коэффициент формы электрода: при плоской контактной поверхности k_2=1,0; при конической k_2=1,5; при электроде со сферической контактной поверхностью – k_2=2.0; C' – средняя удельная теплоемкость материала электрода, Дж/(г·К); γ' – плотность материала электрода, г/см^3.

Ширина зоны нагрева металла x_2 и x_3 зависит от времени сварки $t_{св}$ и температуропроводности металла деталей или электрода α. В общем случаи ширина зоны нагрева определяется:

$$x = 4\sqrt{at_{св}}. \qquad (1.18)$$

Потери тепла Q_4 в атмосферу за счет лучеиспускания, ввиду кратковременности процесса незначительны и в расчетах ими пренебрегают.

Обычно количество тепла Q_1, необходимого непосредственно на образование сварной точки называют полезным теплом $Q_{пол}$, а тепло, расходуемое на нагрев окружающего ядро металл и электроды называют потерями тепла $Q_{пот} = Q_2 + Q_3$.

В определенных пределах $Q_{пол}$ не зависит от продолжительности нагрева и определяется объемом нагретого металла V до температуры $T^{\circ}C$ при удельной теплоемкости c и плотности γ ($Q_{пол} = V\,c\,\gamma\,T$).

Потери теплоты увеличиваются с увеличением продолжительности нагрева, поэтому растет и общее количество теплоты $Q_{ээ}$ (рис. 1.16). При этом неизбежно расширяется зона нагрева при высоком коэффициенте температуропроводности свариваемого материала.

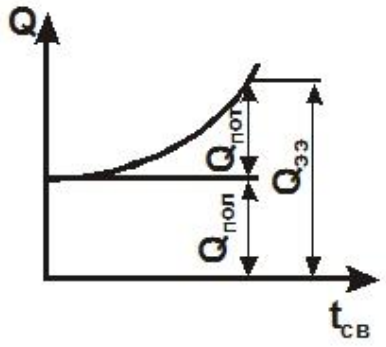


Рис. 1.16. Зависимость необходимой для сварки теплоты от времени нагрева

Современная тенденция в развитии контактной сварки основана на применении мощных машин, обеспечивающих снижение времени сварки, что уменьшает потери электрической энергии, в ряде случаев снижает остаточные деформации и повышает производительность.

При контактной сварке во время нагрева возникают два взаимосвязанных поля: электрическое и температурное.

Температурное поле – совокупность температур в различных точках свариваемых деталей в разные моменты времени. В общем случаи это поле формируется в результате протекающих процессов тепловыделения и теплопередачи, которые были рассмотрены выше.

Характер тепловыделения определяется электрическим полем в свариваемых деталях и электродах.

Электрическое поле – совокупность плотностей тока в различных точках свариваемых деталей в разные моменты времени.

Для контактной сварки характерно неравномерное электрическое поле, его неравномерность зависит от способа подвода тока, температурного и магнитоэлектрического факторов. При подводе тока при точечной, рельефной и шовной сварке на электрическое и как следствие на температурное поля особенно влияет *геометрический фактор*. При этих способах площадь контактных поверхностей электродов мала по сравнению с размерами деталей, через которые проходит сварочный ток. Поле плотностей тока зависит от абсолютных значений потенциалов и электрических сопротивлений деталей и электродов. Наибольшие плотности тока (рис. 1.17, *а*) в сечениях I-I и III-III достигаются в близи границ контактов в результате растекания тока в электродах и деталях. В сечении II-II плотность тока практическим постоянна и постепенно убывает за границами контакта. Неравномерность электрического поля возрастает с уменьшением отношения $d_к/\delta$.

Температурный фактор проявляется в различном сопротивлении металла, нагретого до разных температур. Проходящий ток обтекает более нагретые участки, имеющие меньшую проводимость. Так, удельное электросопротивление жидкого ядра в 1,5–2 раза больше, чем окружающего его твердого металла. Плотность тока в близи границ ядра (рис. 1.17, *б*) заметно повышается (более чем на 25%) и снижается над ядром. Увеличение плотности тока в области уплотняющего пояска способствует его росту по мере роста диаметра ядра.

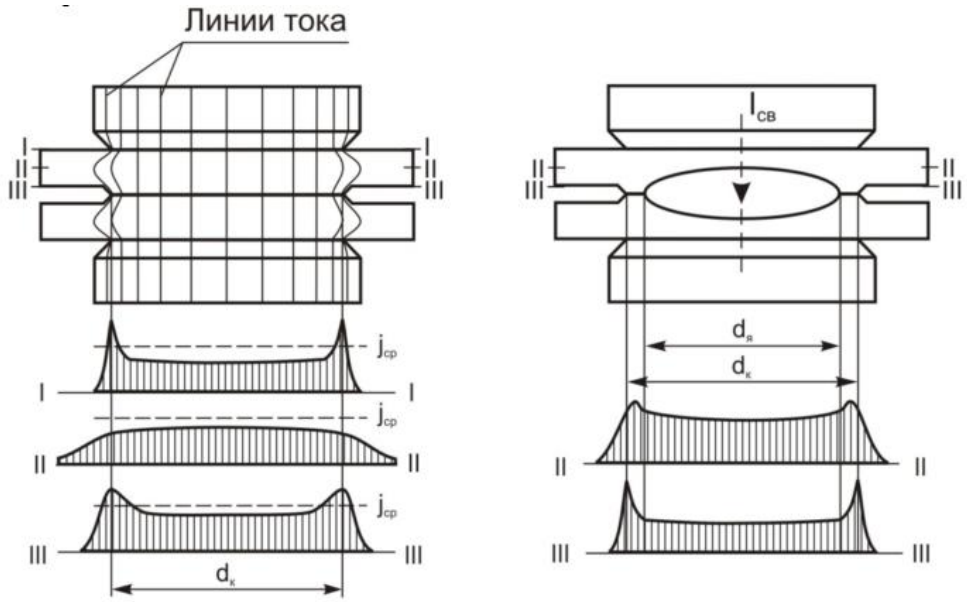


Рис. 1.17. Распределение плотности тока в различных сечениях:
а – в начальный момент сварки; *б* – при наличии жидкого металла

Магнитоэлектрический фактор, связанные с проявлением поверхностного эффекта и эффекта близости мало влияет на характер электрического поля.

Температурное поле при сварки не является стационарным, оно быстро видоизменяется и характеризуется значительной неоднородностью. Во время сварки скорость нагрева очень высокая – до 200 000°С/с. Градиенты температур на отдельных участках могут достигать 100 000°С/с особенно при сварке малых толщин. Вначале поле возникает в твердом металле. Через период времени $(0{,}3–0{,}5)t_{св}$ начинается образование литого ядра в области контакта деталей, где достигается наибольшая плотность тока и в меньшей степени сказывается теплообмен с электродами. По мере прохождения тока ядро растет до максимальных размеров. Максимальная температура в ядре на 15–20% выше температуры плавления металла.

Скорости охлаждения металла соизмеримы со скоростями нагрева. Так, при точечной сварке деталей толщиной 1–4 мм ядро полностью кристаллизуется через 0,02–0,08 секунд. В течении этого времени часть теплоты распространяется в глубь деталей, нагревая околошовную зону.

В зависимости от роли процессов тепловыделения и теплоотвода различают жесткие и мягкие режимы сварки.

Жесткий режим характеризуется кратковременным мощным импульсом тока. Температурное поле определяется преимущественно тепловыделением, потери тепла $Q_2+Q_3 \le 20\%\ Q_{ээ}$. Жестки режим характерен высокими скоростями нагрева и охлаждения, что увеличивает склонность к образованию выплеска расплавленного металла, и для предотвращения этого повышают сварочное усилие.

Мягкий режим характерен значительной длительностью протекания тока относительно малой силы. При этом происходит значительный теплообмен внутри деталей и с электродами ($Q_2+Q_3 \ge 80\%\ Q_{ээ}$). Скорость нагрева и охлаждения ниже, чем на жестком режиме.

На характер температурного поля оказывают большое количество факторов: сила сварочного тока и время его протекания, а также форма импульса тока, сварочное усилие, диаметр и форма электродов, свойства электродных свариваемых материалов, размеры свариваемых деталей и др [1, 2].

1.3.2. Нагрев деталей стыковой сваркой сопротивлением

При **стыковой сварке сопротивлением** общий нагрев деталей происходит теплотой, которая выделяется в них и в контактах при прохождении сварочного тока.

При сварке сопротивлением теплота, выделяющаяся в контакте между торцами свариваемых деталей, относительно невелика и по мере нагрева соединения быстро уменьшается. В общем балансе теплоты она не превышает 10–15%. Однако она выделяется на узкой приконтактной зоне за небольшой промежуток времени и вызывает быстрое повышение в ней температуры, которая сохраняется и после исчезновения $r_{дд}$ до конца цикла сварки, так как эта зона нагрета сильнее других.

Интенсивность тепловыделения в контакте определяется начальным усилием сжатия деталей. При малом $F_н$ интенсивность тепловыделения возрастает, но при этом равномерность нагрева по торцу деталей ухудшается из-за малого и случайного расположения участков контактирования.

Нагрев при сварке сопротивлением можно рассматривать как наложение двух процессов:

1) нагрева (до температуры T_1) бесконтактного стержня теплотой, равномерно выделяемой на собственном сопротивлении по всей его длине (рис. 1.18);

2) дополнительного нагрева (до температуры T_2) теплотой, выделяемой в стыке и распространяющейся в стороны от него.

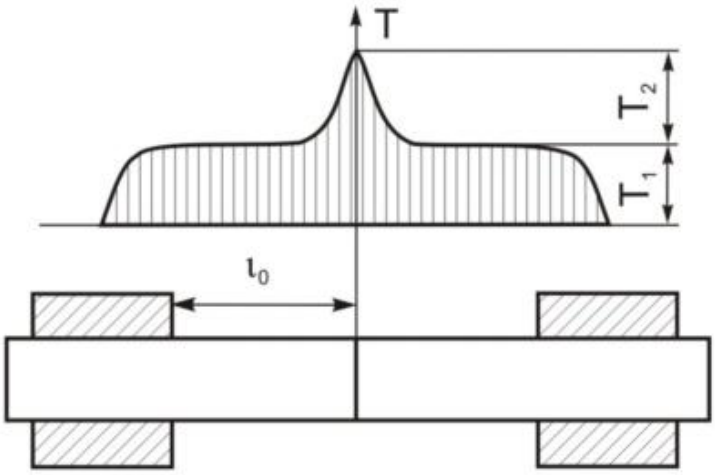


Рис. 1.18. Распределение температуры в деталях при сварке сопротивление

Общая температура нагрева T в зоне, определяемой координатой x, в момент времени $t_{св}$

$$T(x,t) = T_1(t) + T_2(x,t)\ . \qquad (1.19)$$

Распространения тепла в неравномерно нагретом теле без тепловых источников для пространственной задачи описывается уравнением теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right), \qquad (1.20)$$

где $\frac{\partial T}{\partial t}$ – изменение температуры во времени в точке с координатами x, y, z; α – коэффициент температуропроводности, характеризующий скорость распространения тепла, см^2/с.

Распространения тепла в неравномерно нагреваемом теле, т.е. с источником тепла описывается уравнением

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + \frac{q}{c\gamma}, \qquad (1.21)$$

где q – тепловая мощность (количество теплоты выделяемой в секунду), Дж.

Сделав допущения о линейном характере распределения теплового потока, т.е. температура в каждой момент времени одинакова по сечению (рис. 1.18), а удельное электросопротивление металла в вылете l_0 постоянно и имеет среднее значение ρ_{Tcp} уравнение (1.21) примет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{j^2 \rho_{Tcp}}{c\gamma}, \qquad (1.22)$$

В данном уравнении необходимо учесть теплоотдачу с поверхности деталей, которая равна

$$bT = \frac{u\alpha}{Fc\gamma} T, \qquad (1.23)$$

где b – коэффициент температуроотдачи, 1/с; u – периметр сечения деталей, см; F – площадь поперечного сечения детали, см^2.

Согласно принципа независимости действия источников тепла (1.19) подставляя (1.23) в уравнение (1.22) получим систему уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial T_1}{\partial t} = \dfrac{j^2 \rho_{Tcp}}{c\gamma} - bT_1 \\ \dfrac{\partial T_2}{\partial t} = \alpha \dfrac{\partial^2 T_2}{\partial t^2} - bT_2 \end{cases} \qquad (1.24)$$

Решая систему (1.24) относительно температуры в стыке (x=0) получим выражение для температуры в зоне сварки:

$$T_{св} = \frac{I_{св}^2 \rho_{Tcp} t_{св}}{F^2 c\gamma} + \frac{m I_{св}^2 r_k \sqrt{t_{св}}}{F\sqrt{\pi\lambda c\gamma}}, \qquad (1.25)$$

где $r_к$ – контактное сопротивление в начальный момент сварки, определяемое по формуле (1.7), мкОм; m – коэффициент, учитывающий изменение $r_к$ в процессе сварки (m = 0,4).

Из уравнения (1.25) можно найти необходимое значение сварочного тока [1, 6].

$$I_{св} = \sqrt{\frac{T_{св}}{\frac{\rho_{Tср} t_{св}}{F^2 c\gamma} + \frac{m r_k \sqrt{t_{св}}}{F\sqrt{\pi\lambda c\gamma}}}}, A \qquad (1.26)$$

1.3.3. Нагрев деталей стыковой сваркой оплавлением

В отличие от сварки сопротивлением **нагрев деталей при стыковой сварке оплавлением** в основном происходит за счет теплоты, выделяющейся в контактном сопротивлении, которое определяется перемычками расплавленного металла, находящимися в искровом промежутке.

Доля теплоты, выделяемой с собственном сопротивлении деталей вследствие относительно малой средней плотности тока, невелика и обычно не учитывается в тепловых расчетах.

Жидкие перемычки являются основным источником нагрева торцов деталей. В начальный момент оплавления распределение температуры на оплавленных торцах неравномерно (рис. 1.19). По мере нагрева степень неравномерности уменьшается. Средняя температура на торцах растет до тех пор, пока их поверхности не покроются слоем расплавленного металла. Это обеспечивается при установившемся процессе оплавления, когда перемычки последовательно и многократно с большой частотой возникают по всей площади торцов деталей.

В секунду в контакте с сопротивлением $r_{опл}$ выделяется количество тепла $q_{опл} = I_{св}^2 r_{опл}$, которое расходуется на нагрев металла от T_1 до $T_{опл}$, выбрасываемого из зазора при оплавлении ($q'_{опл}$), и на теплопередачу в детали ($q''_{опл}$):

$$q_{опл} = q'_{опл} + q''_{опл} = v_{опл} F\gamma\left[c(T_{опл} - T_1) + m_0\right] + 2\lambda F\frac{dT}{dx}, \qquad (1.27)$$

где F – сечение деталей, см^2; γ, c, λ, m_0 – плотность, удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности и скрытая теп-

лота плавления свариваемого материала; T_1 – средняя температура торцов (в начале оплавления – окружающей среды, к концу – температуре плавления, при сварке с подогревом $T_1 = T_{опл}$); $T_{опл}$ – средняя температура выбрасываемого при оплавлении металла (для стали $T_{опл}$ = 2000 °С); dT/dx – градиент температуры у торца (для стали dT/dx = 2000–8000 °С/см).

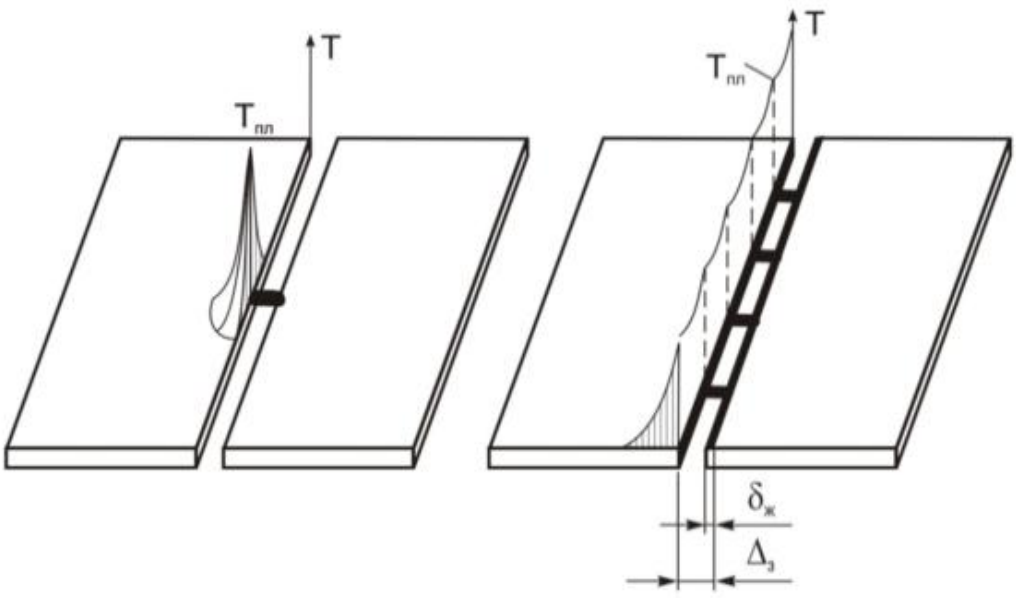


Рис. 1.19. Схема распределения температуры при сварке оплавлением в начальной и конечной стадии процесса

Из уравнения теплового баланса (3.14) можно определить необходимую величину сварочного тока или скорости оплавления.

Анализ формулы показывает, что мгновенная скорость оплавления растет:

1) с увеличением тепловой мощности,

2) с уменьшением градиента температуры,

3) с повышением температуры T_1.

В начале процесса, когда dT/dx велик и $T_1 \approx 0$ оплавление идет медленно. По мере разогрева торцов $v_{опл}$ растет. Для поддержания непрерывного процесса оплавления при неизменной мощности скорость сближения деталей должна соответствовать $v_{опл}$. Подогрев деталей до $T_1 = T_{под}$ увеличивает возможную скорость их сближения при данной мощности [1, 2, 6].

1.4. Особенности поведения металла в контакте при сварке

1.4.1. Плавление и кристаллизация сварной точки

При **точечной, рельефной и шовной сварке** сварное соединение образуется из общей ванны жидкого металла в результате кристаллизации. Расплавление металла начинается с центральной зоны соединения и постоянно расширяется на периферию. Расплавленный металл удерживается от вытекания в зазор уплотняющим пояском, где сварка произошла в твердой фазе. На поверхности металла обычно присутствуют пленки оксидов и остатки загрязнений, даже при тщательной зачистке. Все эти неметаллические вещества частично выдавливаются к периферии в начальной стадии нагрева, а часть их распределяется по всему объему литого ядра.

Расплавленный металл литого ядра под действием электромагнитных сил, возникающих от взаимодействия сварочного тока с его собственным электромагнитным полем, находится в движении и хорошо перемешивается. При этих способах сварки средний химический состав литого ядра не изменяется, так как весь его объем хорошо герметизирован и надежно изолирован от окружающей атмосферы.

После выключения сварочного тока начинается быстрое охлаждение металла и возникновение первых центров кристаллизации на поверхности оплавленных зерен. Преимущественное развитие получают те зерна, ориентация которых наиболее благоприятна для отвода теплоты. Рост зерен идет в форме дендритов до взаимной встречи в центре ядра.

При сварке цветных металлов и сплавов на их основе кристаллизация вследствие большой теплопроводности идет с большой скоростью. Если эти материалы имеют не большой температурный интервал кристаллизации, то образуются дендриты. При большом интервале кристаллизации в центре литого ядра появляется область неориентированных кристаллов. Этому способствует также ликвация во время охлаждения. По мере кристаллизации расплавленный металл обогащается легирующими примесями и его состав приближается к составу эвтектики, а оставшееся масса металла начинает кристаллизоваться сразу из многих центров. Во время кристаллиза-

ции металл затвердевает как бы в «изложнице», которая образуется массой свариваемого металла. Несвободная усадка приводит к образованию рыхлот. Этот дефект устраняется проковкой, которая вызывает термопластическую деформацию еще нагретого металла.

1.4.2. Процессы рекристаллизации при стыковой сварке сопротивлением

При **стыковой сварке сопротивлением** детали приводятся в тесное соприкосновение и деформируются. При этом разрушаются окисные пленки и пограничные зерна. Искажение кристаллической решетки приводит к наклепу в приграничной зоне – общему или местному упрочнению металла по отношению к исходному. При нагреве деталей проходящим током до температуры выше 300 °С (для сталей) искажения кристаллической решетки незначительно уменьшаются благодаря аннигиляции преимущественно вакансий. Такой процесс называют отдыхом или возвратом. Дальнейший рост температуры выше 400 °С приводит к локальному снятию искажений кристаллической решетки. При этом происходит зарождение центров рекристаллизации. Эти центры вырастают до размеров самостоятельных кристаллов, обладающих минимальным искажением кристаллической решетки и малой плотностью вакансий и дислокаций. Процесс восстановления кристаллов без изменения кристаллической решетки называется рекристаллизацией и по А.А. Бочвару протекает при $T_{рек} \geq 0{,}4T_{пл}$.

При температуре выше температуры рекристаллизации на границе контакта деталей из осколков образуются общие зерна для обоих металлов. Процесс образования совместных зерен называется процессом взаимной или совместной рекристаллизации. Совместная рекристаллизация идет интенсивнее с увеличением температуры и степени пластической деформации.

Процесс роста зерен при температуре выше 950–1000 °С за счет соседних зерен называется собирательной рекристаллизацией. Если рост зерен идет с образованием совместных рекристаллизованых зерен принадлежащим одновременно двум соединяемым деталям этот процесс называется совместной рекристаллизацией.

Решающее влияние на процесс образования соединения оказывают окисные пленки на торцевой поверхности. Условия разрушения и удаления окислов в зоне сварки зависит от температуры сварки и свойств окислов.

Нагрев одновременно *благоприятно* и *неблагоприятно* влияет на образование соединения.

С ростом температуры *облегчается* выравнивание поверхностей, ускоряется образование активных центров (заметно при $T > T_{кр}$), облегчается сохранение прочного соединения после снятия сварочного давления.

Неблагоприятное действие нагрева связано с ускорением окисления и трудностью удаления окислов из стыка, однако высокотемпературный нагрев, сопровождаемый оплавлением металла или расплавлением окисла, может облегчить удаление окислов из зоны сварки. Однако нагрев до чрезмерно высокой температуры может понизить свойства соединения из-за ухудшения структуры, разупрочнения металла в зоне термического влияния и т.д.

Для каждого металла имеется диапазон оптимальных температур сварки в твердом состоянии, в котором обеспечивается наилучший комплекс свойств соединения [7, 9, 10].

С повышением в стали содержания углерода температурный интервал сварки в твердом состоянии уменьшается (рис. 1.20).

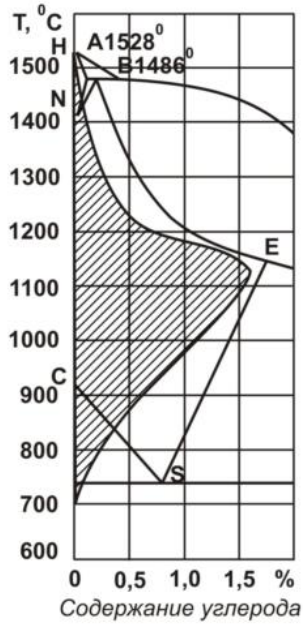


Рис. 1.20. Температурный интервал стыковой сварки сопротивлением стали с различным содержанием углерода

Образования соединения в твердом пластическом состоянии не происходит существенного изменение химического состава в зоне сварки.

1.4.3. Процесс оплавления

Основная технологическая роль оплавления заключается в нагреве деталей до образования на торцах слоя расплавленного металла, а также соответствующего распределения температур в околошовной зоне для проведения последующей осадки с целью удаления расплава и оксидов. Это достигается оплавлением (при сварке непрерывным оплавлением) или в сочетании с предварительным подогревом (при сварке оплавлением с подогревом).

Механизм нагрева при оплавлении можно представить следующим образом (рис. 1.21):

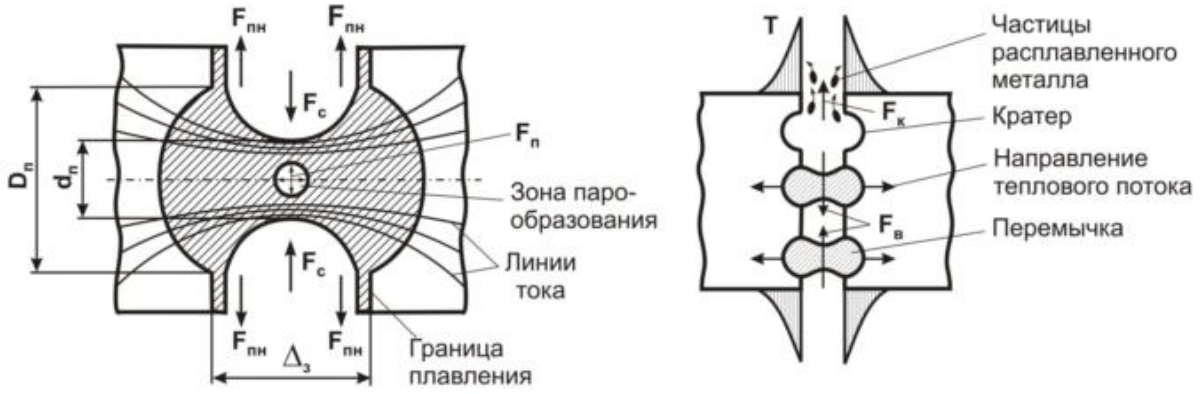


Рис. 1.21. Схема перемычек расплавленного металла при оплавлении

При сближении деталей при включенном напряжении и малом давлении между твердыми или жидкими локальными участками поверхности торцов образуются электрические контакты. Нагрев контактов происходит током, который вызывает их быстрое плавление и образование перемычек из жидкого металла. Перемычки быстро разрушаются. Длительность существования перемычек обычно не превышает 0,001–0,005 с. Форма и размеры перемычек определяются действием двух основных противоположно направленных сил: сил от поверхностного натяжения $F_{пн}$, стремящихся при сближении деталей уменьшить зазор Δз, увели-

чить диаметр перемычки d_n, и электромагнитных сил F_c (пропорциональных квадрату сварочного тока), стремящихся сжать и разорвать перемычку. Сжатие перемычки вызывает увеличение в ней плотности тока и скорость нагрева. При достаточно большой плотности тока (например, ~3000 А/мм^2, при оплавлении низкоуглеродистой стали) металл в центре перемычки переходит в парообразное состояние и вызывает ее парообразное состояние от сил F_n. Давление паров в момент взрыва достигает 10–20 МПа, а температура 6000–8000 $^\circ$С. Расплавленный металл выбрасывается из зазора в виде искр (со скоростями, превышающими 60 м/с), что ведет к укорачиванию деталей [7, 9, 10].

Перемычки в стадии их формирования до момента разрушения служат источником нагрева околошовной зоны (за счет теплопроводности). С увеличением времени существования перемычек градиент температуры нагрева деталей снижается, и наоборот. Разрушение перемычек и выброс нагретого металла за пределы искрового промежутка рассматривают как потерю накопленной тепловой энергии. Разрушение перемычек сопровождается образованием на торцах углублений – кратеров. С увеличением размеров перемычек увеличивается размер кратеров: рельеф поверхности торцов ухудшается.

Между одновременно существующими перемычками, как между проводниками с током одинакового направления, действуют электромагнитные силы $F_в$, стремящиеся их сблизить и объединить. Однако из-за быстрого разрушения перемычек этот процесс обычно не успевает завершиться.

Силы $F_к$, вызванные взаимодействием тока в перемычках с магнитным полем сварочной машины, способствуют их перемещению в искровом промежутке и выталкиванию из сварочного контура.

Для процесса оплавления характерны высокие локальные плотности тока в перемычках и малая средняя плотность тока, отнесенная ко всему сечению деталей.

Оплавление сопровождается характерными электрическими процессами:

При сближении торцов и образовании одного контакта (рис. 1.22, *а*) напряжение u_{20} снижается до $u_{ээ}$ (точка 1). При увеличении тока $i_{св}$ напряжение $u_{ээ} = r_{ээ}i_{св}$ несколько возрастает, а затем

при взрыве перемычки (точка 2), за счет запасенной в магнитном поле машины энергии, резко увеличивается (точка 3), превышая u_{20}. Расход накопленной энергии сопровождается снижением напряжения до значения u_{20} и плавным спадом до нуля. При возникновении очередного единичного контакта процесс повторяется. Обычно при оплавлении за полупериод (0,01 с) наблюдается 4–7 пульсаций тока. При этом если ток снижается до нуля (точка 4), на кривой $u_{ээ}$ возникают пульсации напряжения, значения которых часто превышают u_{20}. Такой механизм соответствует режиму образования и разрушения одинаковых перемычек. Если ток не достигает нулевого значения (рис. 1.22, *б*), пульсации напряжения снижаются. Это указывает на одновременное существование нескольких параллельных перемычек и на неодновременное их разрушение [7, 9, 10].

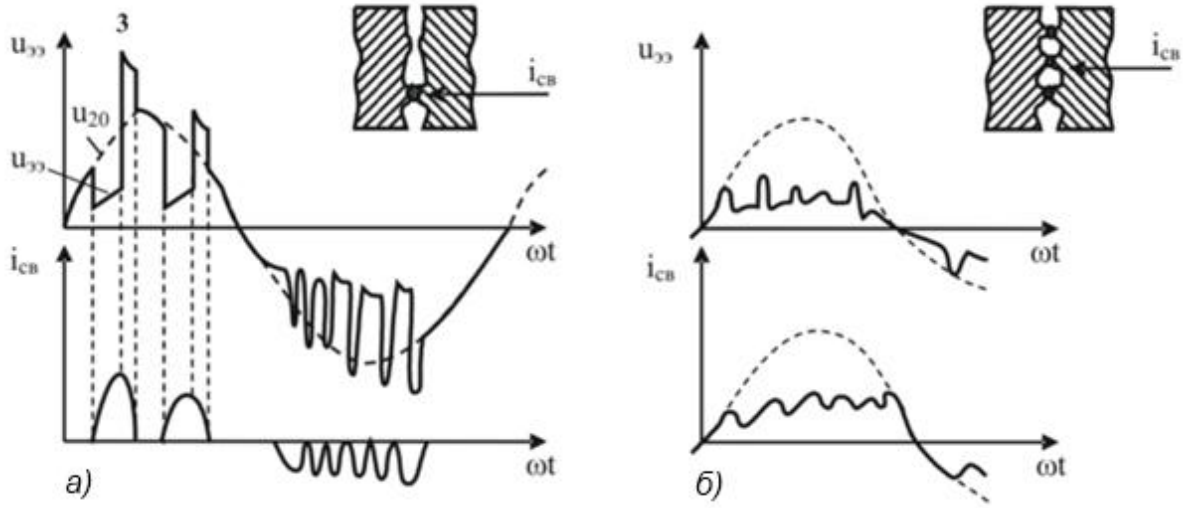


Рис. 1.22. Электрические процессы при оплавлении (машина однофазная переменного тока):
а – одиночные перемычки; *б* – несколько одновременно существующих перемычек

При оплавлении деталей больших сечений образуются контакты площадью 1000 мм^2 и более. Длительность их существования может достигать нескольких полупериодов тока промышленной частоты. Разрушение таких контактов происходит в основном в результате их местного плавления, при котором жидкий металл под действием электромагнитных сил выдавливается в зазор и кристаллизуется, и лишь небольшая часть металла выбра-

сывается в результате взрыва. При уменьшении зазора развивается вторичное плавление металла, закристаллизовавшегося в зазоре в процессе местного плавления контакта.

При сварке средних сечений в большинстве случаев ведут сварку непрерывным оплавлением (до 5000 мм^2) или оплавлением с предварительным подогревом (до 10 000 мм^2). В первом случае необходимо вести процесс при минимальном напряжении U_{20}, однако, достаточном для устойчивого оплавления.

Предварительный подогрев облегчает возбуждение оплавления, однако при больших сечениях (как и при сварке сопротивлением) не обеспечивает равномерности нагрева торцов, а также требует чрезмерно высокой электрической мощности.

Одним из главных параметров режима стыковой сварки оплавлением является скорость оплавления $v_{опл}$. Она оказывает решающее влияние на температурное поле, равномерность распределения температур, рельеф поверхности торцов, степень окисления металла торцов, качество сварного соединения.

При оплавлении на одну и ту же величину ($\Delta_{опл}$) увеличение средней скорости приводит к сужению зоны нагрева деталей и увеличению градиента температур dT/dx, уменьшению времени существования перемычек и более равномерному нагреву торцов деталей вследствие их более интенсивного оплавления. В тоже время размеры перемычек и кратеров увеличиваются (рельеф поверхности торцов ухудшается). При снижении скорость увеличивается длительность существования перемычек и глубина прогрева деталей, а градиент температур снижается. Размеры перемычек снижаются, а рельеф поверхности улучшается. Однако нагрев торцов становится менее равномерным. Для конкретных условий сварки существует некоторая оптимальная средняя скорость оплавления, которая обеспечивает наилучшие показатели качества соединений.

При некоторой постоянной скорости $v_{опл}$, которая зависит от теплофизических свойств свариваемых металлов и условий оплавления, достаточно каждую деталь оплавить на величину $\Delta_{опл}$, чтобы приблизится к квазистационарному состоянию, при котором на торцах образуется слой расплавленного металла, и дальнейшее оплавление мало меняет температурное поле.

Наличие между оплавляемыми торцами паров металла и энергичное окисление мельчайших его капель, выбрасываемых при взрыве перемычек, снижает содержание кислорода в зазоре и уменьшает окислительную способность газовой среды. С увеличением интенсивности оплавления содержание кислорода в зоне сварки уменьшается. Оно уменьшается при повышении содержания в стали углерода.

Удаление из зазора жидкого металла при осадке приводит к изменению химического состава металла в зоне сварки, прежде всего снижению содержания углерода. Это объясняется первоочередным плавлением металла с более высоким содержанием углерода (перлитная составляющая) и последующим его удалением из стыка при осадке. Снижению содержания углерода и других легирующих элементов также способствует их выгорание в результате большего сродства с кислородом. В результате металл в зоне сварки сильно обедняется углеродом и при травлении на шлифах выявляется белая ферритная полоска.

Наличие зоны частичного расплавления вблизи стыка приводит к появлению рыхлот, горячих трещин, пор и других пороков. Ширина зоны частичного расплавления шире для материалов с большим температурным интервалом кристаллизации (ТИК). В сталях с большим содержание углерода ТИК шире. Наличие в стали эвтектик, в первую очередь FeS, расширяет зону частичного расплавления [7, 9, 10].

1.5. Процессы, протекающие в околошовной зоне

При **точечной, рельефной и шовной сварке** в околошовной зоне могут наблюдаться изменения исходной структуры и свойств сплава в результате развития ряда процессов, связанных с термическим циклом сварки: закалки, оплавления легкоплавких составляющих по границам зерен (эвтектик), отпуска, рекристаллизации и т. п. В этой зоне металл нагревается ниже температуры плавления и подвергается частично пластической деформации. В околошовную зону входит и металл уплотняющего пояска, окружающего литое ядро.

Околошовная зона оказывает существенное влияние на качество сварного соединения. В большинстве случаев разрушение

соединений происходит в этой зоне, что определяется соотношением площадей литого ядра и окружающего его периметра. В металлах, толщина которых меньше 2–2,5 мм, площадь разрушения по периметру литого ядра оказывается меньше и здесь происходит разрыв [7, 9, 10].

При соединении низкоуглеродистой стали в зоне 2 (рис. 1.23), непосредственно примыкающей к ядру 1, наблюдается оплавление границ зерен (пережог металла).

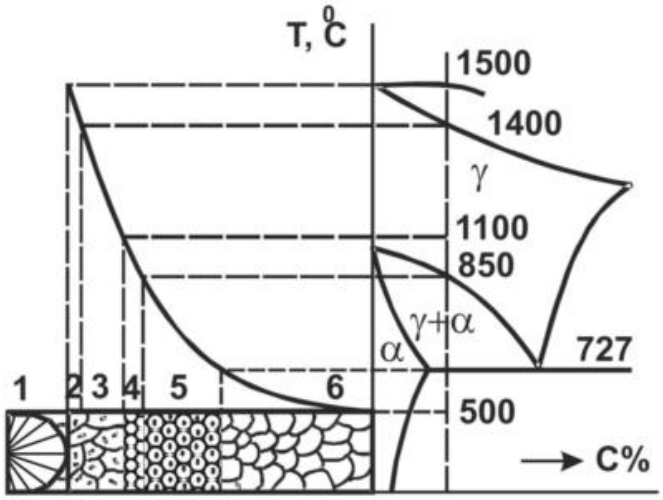


Рис. 1.23. Структура околошовной зоны при сварке низкоуглеродистых сталей:
1 – ядро; 2 – зона частичного оплавления границ зерен; 3 – зона перегрева; 4 – зона закалки; 5 – зона частичной закалки; 6 – зона отпуска и рекристаллизации

Далее расположена зона перегрева, отличающаяся крупнозернистым строением и участками оплавления границ зерен аустенита (зона 3, рис. 1.23). В участках, которые были нагреты выше Ac_3 (зоны 3–5), иногда обнаруживаются включения мартенсита, образующегося в результате быстрого охлаждения и торможения диффузии углерода. Для околошовной зоны характерно некоторое увеличение исходного зерна (зона 6), что может привести к заметному снижению пластичности соединения, особенно при сварке холоднокатаной (наклепанной) стали.

Сварка закаливающихся сталей сопровождается более глубокими изменениями свойств металла и, в первую очередь, его пластичности. При сварке закаленной и отпущенной стали в око-

лошовной зоне отмечаются участки мартенсита (рис. 1.24), отличающиеся малой пластичностью и небольшим сопротивлением образованию трещин [7, 9, 10].

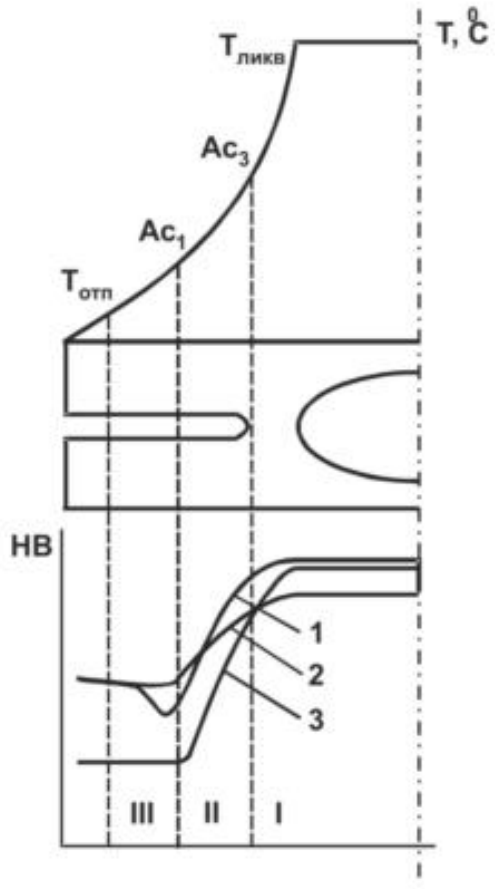


Рис. 1.24. Изменение твердости в околошовной зоне при точечной сварке низколегированной стали:
1 – сварка закаленной и отпущенной стали; 2 – сварка закаленной и отпущенной стали при многоимпульсном режиме; 3 – сварка отожженной стали; I, II и III – соответственно зоны полной и частичной закалки, высокого отпуска

С увеличением содержания углерода и легирующих элементов в стали, как отмечалось выше, расширяется температурный интервал кристаллизации и усиливается склонность к закалке. Так при сварке среднеуглеродистых и низколегированных сталей с эквивалентным содержанием углерода выше 0,45 % скорость охлаждения зоны сварки как на жестком так и на мягком режиме выше критической $W_{кр}$ (рис. 1.25). Аустенит переходит в хрупкий и твердый мартенсит.

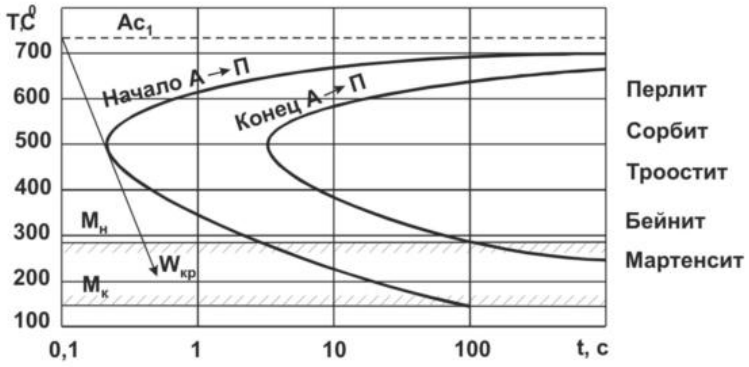


Рис. 1.25. Диаграмма изотермического распада аустенита доэвтектоидной среднеуглеродистой стали

При соединении высоколегированных, термически упрочняемых алюминиевых и магниевых сплавов возникает опасность оплавления легкоплавких составляющих, расположенных по границам зерен (рис. 1.26), и снижения пластичности сварных соединений.

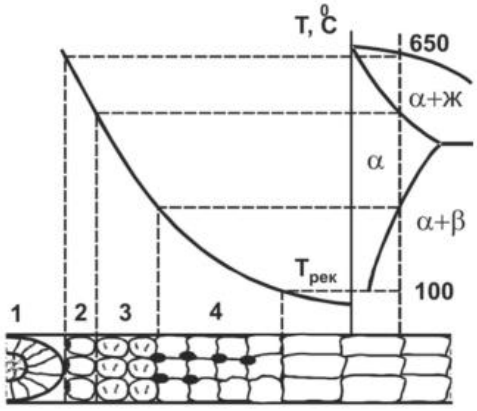


Рис. 1.26. Структура околошовной зоны при сварке закаленных и состаренных алюминиевых сплавов:
1 – ядро; 2 – зона частичного оплавления границ зерен; 3 – зона закалки; 4 – зона отпуска и рекристаллизации; 5 – исходная структура сплава

Сплавы, не упрочняемые термообработкой, например сплавы АМг6 и МА2-1 склонны к рекристаллизации и укрупнению зерна, что может сказаться на снятии эффекта нагартовки и снижении прочности соединений.

Аустенитные стали, не стабилизированные введением карбидообразующих элементов (титана или ниобия), чувствительны к обеднению границ зерен хромом, что имеет связь с диффузией углерода к границе зерна и образованию на этих границах кар-

бидов хрома. Подобное изменение состава может привести к межкристаллитной коррозии. Однако заметное обеднение границ наблюдается при пребывании металла в интервале температур 550–700 °С свыше 1 мин.

Степень развития указанных выше процессов можно в значительной мере регулировать за счет режимов сварки. В частности, процессы рекристаллизации, выпадения (растворения) составляющих сплава и т. д., контролируемые диффузией, легко подавляются при применении жестких режимов сварки. Склонность к закалке может быть снижена при использовании многоимпульсных режимов, замедляющих скорость охлаждения.

Ширина зоны термомеханического влияния при точечной и шовной сварке весьма ограничена (иногда менее 1 мм) по сравнению с шириной этой зоны при других способах сварки в жидкой фазе, например, при дуговой, вследствие относительно малой длительности нагрева. Благоприятное влияние на свойства металла околошовной зоны оказывает в ряде случаев усилие сжатия и пластическая деформация, которая приводит к измельчению хрупких прослоек по границам зерен и снижению уровня растягивающих напряжений. Поэтому, как правило, сварные узлы, выполненные точечной и шовной сваркой, не нуждаются в последующей термообработке.

При **стыковой сварке** околошовная зона имеет большие размеры вследствие большой длительности нагрева. При сварке сопротивлением в околошовной зоне состав материала не изменяется. При сварке оплавлением в этой зоне, на ряду с изменением структуры, возможно и изменение состава. Изменение состава вызывается явлением ликвации, из-за которого при кристаллизации сплава в зоне частичного расплавления он обогащается основным элементом.

В условиях стыковой сварки всегда имеется зона частичного расплавления. При очень быстром нагреве оплавляются границы зерен без заметного роста зерна (например, при точечной сварке дуралюмина). При замедленном нагреве (стыковая сварка стали) в зоне частичного расплавления возможен значительный рост зерна, иногда сопровождаемый усадочной рыхлостью. Чем медленнее нагрев и больше температурный интервал

кристаллизации, тем шире зона частичного расплавления и тем вероятнее появление в ней местных пороков.

Строчечная структура, при которой «строчки», обогащенные легирующими элементами, плавятся при более низкой температуре, чем основной сплав, может приводить к расслоению материала при осадке. Изменения структуры и свойств свариваемого материала в менее нагретых участках околошовной зоны зависят от его состава и предшествующей термической и механической обработки.

При сварке скорость охлаждения велика. Поэтому материалы, претерпевающие при нагреве до температуры сварки фазовые превращения (например, перекристаллизацию в перлитной стали, растворение упрочняющих фаз в алюминиевых сплавах и др.), закаливаются. При сварке закаливающейся стали это может приводить к высокой твердости (рис. 1.27, *а*) и хрупкости при сварке термически упрочненных алюминиевых сплавов, а также незакаливающейся холоднокатаной стали, наоборот, к умягчению и разупрочнению этой зоны (рис. 1.27, *в*).

На участке, нагретом ниже температуры фазовых превращений в материале, не подвергавшемся предварительной термической или механической обработке (наклепу), изменений структуры и свойств не наблюдается. Нагрев материалов, термически обработанных при температуре T_1, в интервале температур выше T_1 и ниже T_2 (температура начала фазовых превращений) приводит к местному разупрочнению. Например, сталь, закаленная и отпущенная при 550 °С, дополнительно отпускается и несколько разупрочняется на участке, нагретом в интервале температур 550° – Ac_1 (рис. 1.27, *б*); наклепанный материал несколько разупрочняется на участке, нагретом выше температуры возврата [7, 9, 10].

Таким образом, разупрочнение свариваемого материала в околошовной зоне может явиться следствием изменения его состава; частичного расплавления и роста зерна; закалки, отпуска, возврата. При этом степень разупрочнения, связанная с диффузионными процессами, тем меньше, чем быстрее протекает нагрев.

Свойства соединений часто зависят от исходного состояния свариваемого материала. Например, при стыковой сварке труб из хромомолибденованадиевой стали 12Х2МФБ, получившей при

прокатке значительный наклеп и имевшей неоднородное зерно, рекристаллизация в околошовной зоне, сопровождаемая значительным ростом зерна, вызывала катастрофическое падение ударной вязкости (до 0,5–1 Дж/см^2). Соединения этих же труб, сваренных после предварительной нормализации, устранившей наклеп и неоднородность микроструктуры, имели ударную вязкость около 15 Дж/см^2.

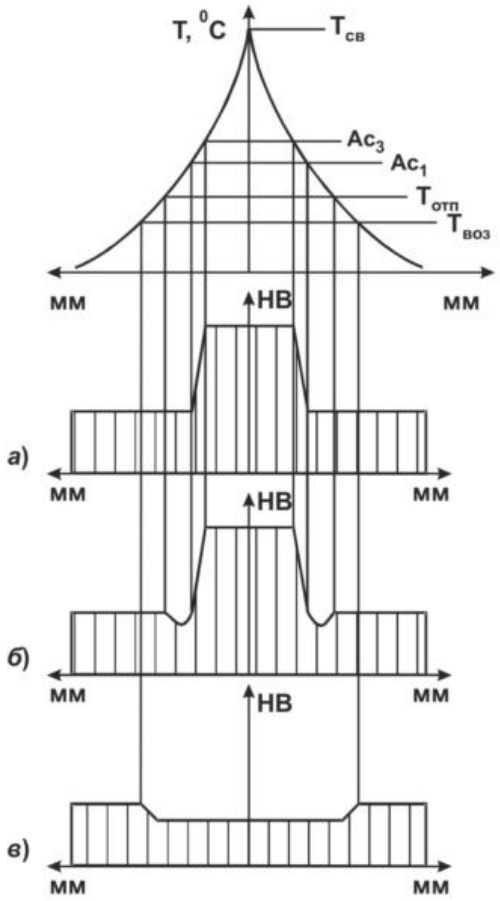


Рис. 1.27. Изменение твердости в околошовной зоне при сварке:
а – отожженной закаливающейся стали; *б* – той же стали в закаленном и отпущенном состоянии; *в* – не закаливающейся холоднокатанной стали

1.6.Пластическая деформация при контактной сварке

1.6.1. Роль пластической деформации

Соединение свариваемых деталей при контактной сварке происходит путем образования связей между атомами в зоне контакта этих деталей. При этом для образования физического кон-

такта и активации свариваемых поверхностей затрачивается тепловая и механическая энергия, подводимая извне.

Пластическая деформация металла – один из основных процессов, способствующих формированию соединений, вызывается как внешними факторами – усилием со стороны электродов, так и внутренними, возникающими при несвободном расширении металла зоны сварки.

Основная роль пластической деформации заключается в следующем:

1) формирование электрического контакта;

2) уплотнение металла при охлаждении;

3) удаление окисных пленок.

В зависимости от объема деформируемого металла различают микропластическую деформацию рельефа контакта поверхности и объемную пластическую деформацию значительных масс металла зоны сварки.

Процесс пластической деформации неразрывно связан с процессом нагрева, тесная взаимосвязь их проявляется в эффекте саморегуляции теплового состояния зоны сварки, путем соответствующего изменения сопротивления пластической деформации, размеров контакта, плотности тока. Так, при случайном увеличении тока и росте температур снижается сопротивление пластической деформации, что приводит к увеличению площади контактов, снижению плотности тока, уменьшению интенсивности нагрева и определенной стабилизации температурного поля [9, 10].

1.6.2. Пластическая деформация при точечной сварке

При точечной сварке роль пластической деформации в образовании металлических связей не велика из-за малой относительной сдвиговой деформации в пластическом поясе. Высокое значение относительной площади физического контакта (до 100 %) достигается в результате плавления металла и удаления пленок под действием электродинамических сил. Однако вследствие неравномерного нагрева образуются зоны металла с различным сопротивлением пластическому деформированию. Тепловое расширение металла происходит в стесненных условиях и сопровождается возникновением неравномерным распределением внутренних

напряжений, которые в сочетании с постоянно действующим усилием сжатия вызывают необратимые пластические деформации.

Упрощенная качественная модель напряжений, сил и деформации в стадии нагрева представлена на рис. 1.28.

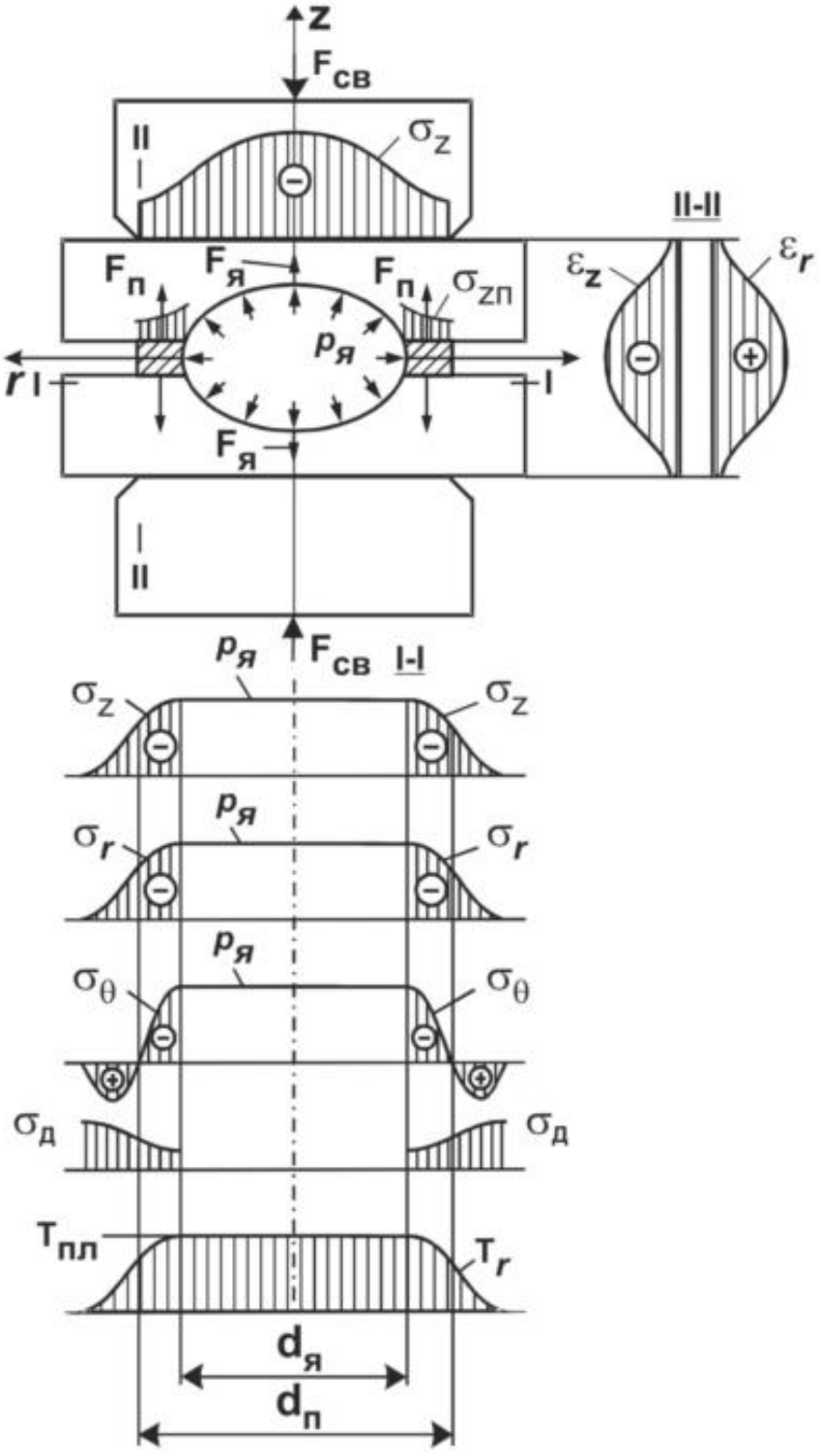


Рис. 1.28. Характер пластической деформации при точечной сварке

Объемно-напряженное состояние зоны сварки характеризуется сжимающими радиальными (σ_r), окружными (σ_θ) и осевыми (σ_z) напряжениями (последние суммируются с σ_r и σ_θ), а также деформациями ε_z, ε_θ и ε_r.

Наибольшие значения σ_z отмечаются вблизи оси z, где напряженное состояние близко к всестороннему сжатию. Наименьшее значение σ_z – на периферии контактов и особенно на границе контакта деталь-деталь где в зазор между деталями относительно свободно течет деформируемый металл.

Наибольшая степень пластической деформации (ε_z, ε_θ и ε_r) отмечается в области пояска ($z = 0$). Характер распределения ε_z и ε_r в области пластического пояска (сечение II-II) показывает, что по оси z происходит деформация укорочения, а по оси r – деформация удлинения. Вблизи поверхностей деталей ε_z, ε_θ и ε_r практически равны нулю.

Тепловое расширение металла в области контакта деталь-деталь – основная причина образования зазора, в который происходит пластическое вытеснение части нагретого металла.

До расплавления снижение сопротивление металла пластическому деформированию $\sigma_Д$ и избыток металла за счет дилатометрического эффекта компенсируются небольшим раздвиганием электродов, а также вытеснением части металла в зазор, что обеспечивает во внутреннем контакте рельеф, ограничивающий растекание сварочного тока.

При расплавлении в замкнутом объеме резко увеличивается объем металла ядра, возбуждаются электромагнитные силы, в результате возникает гидростатическое давление ($p_я$), определяемое общим балансом напряжений в зоне сварки. Дилатометрический эффект и общее снижение $\sigma_Д$ компенсируются раздвиганием электродов и дальнейшим вытеснением в зазор деформируемого металла. Это способствует образованию не только рельефа, ограничивающего растекание сварочного тока, но и герметизацию литого ядра, предохраняя металл от выплеска и контакта с атмосферой.

Сварочное усилие $P_{св}$ на стадии плавления должно быть наибольшим, так как оно контролирует устойчивость процесса против образования выплеска. Это усилие возрастает при увеличении $\sigma_Д$

металла, например, при жестких режимах сварки или при сварке жаропрочных металлов. Оно может быть уменьшено путем предварительного подогрева деталей.

Внутренняя граница металла пояска имеет температуру, близкую к температуре плавления, и низкое значение $\sigma_Д$; соответственно температура внешней границы намного ниже, а $\sigma_Д$ больше. Металл пояска находится в объемно-напряженном состоянии, при этом сжимающие напряжения (σ_{zn}) и сила F_n стремятся увеличить зазор между деталями.

Рассмотренный характер объемной деформации приконтактной области в сечении деталей I–I вызывает «оседание» верхних слоев металла и образование вмятины от электрода на поверхности. Скорость этого оседания и размеры вмятины резко возрастают при образовании внутреннего выплеска.

Общая степень пластической деформации, определяемая глубиной вмятины ($\Delta_{вм}$), составляет обычно ~ 10–20% от толщины детали и в соответствии с указанными выше этапами состоит из следующих составляющих: $\Delta_{вм} = \Delta_К + \Delta_у + \Delta_{пр}$, где, $\Delta_К$, $\Delta_у$ и $\Delta_{пр}$ – степень деформации, необходимая соответственно для формирования электрического контакта на I этапе, уплотняющего пояса на II этапе и проковки (уплотнения) ядра на III этапе.

При обычной схеме сварки можно предполагать наличие некоторого динамического равновесия между величиной $F_{св}$, средним сопротивлением пластической деформации зоны сварки и количеством вытесненного металла в зазор между деталями.

Нарушение такого равновесия приводит или к быстрому росту пластического пояска, снижению плотности тока и замедлению роста литого ядра – устойчивый процесс сварки, или, наоборот, к быстрому росту литого ядра, увеличению давления $p_я$, замедлению роста пояска, разгерметизации расплавленной зоны и выплеску [7, 10].

1.6.3. Особенности объемной пластической деформации при шовной и рельефной сварке

Шовная сварка по сравнению с точечной, особенно при малых скоростях, отличается повышенным теплосодержанием ме-

талла и малыми значениями σ_∂. Поэтому шовную сварку можно производить при относительно небольших сварочных усилиях на жестких режимах.

Значение $\Delta_{пр}$ ограничено по отношению к $\Delta_у$, так как при проковке металл охлаждается, а напряжения значительно меньше, чем к началу II этапа, вследствие увеличения площади контакта. Степень деформации на этом этапе может быть повышена проковкой под током за счет дополнительного импульса или модуляции (плавного спада) тока.

При выполнении первой точки шва характер пластической деформации такой же, как при точечной сварке. Однако при сварке следующих точек перед роликом металл деформируется в зазор, как и при точечной сварке, а позади ролика металл вытесняется под ролик (рис. 1.29, *а*). На поверхности шва образуется серповидный рельеф. Вследствие относительно высокого теплосодержания зоны соединения при шовной сварке общая степень пластической деформации и размеры уплотняющего пояска больше. Это дает возможность несколько уменьшить время сварки и усилия по сравнению с режимами точечной сварки.

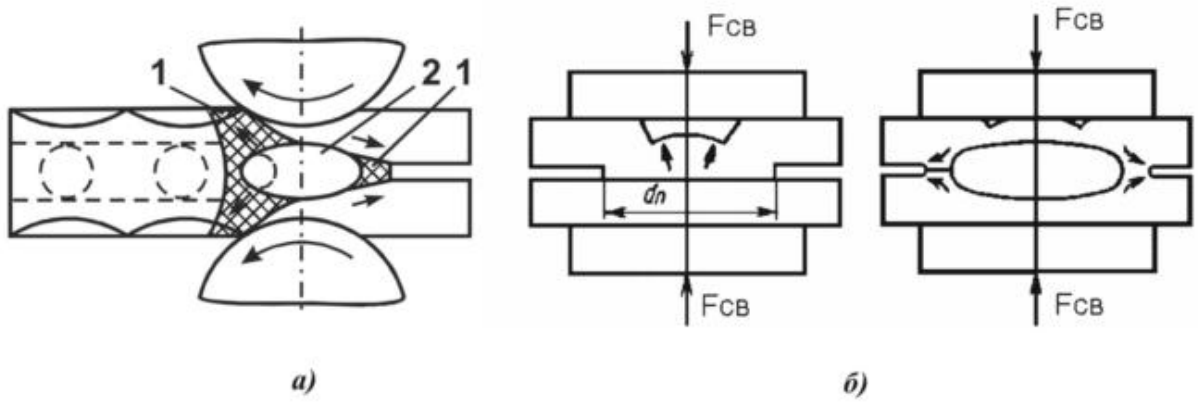


Рис. 1.29. Направление пластической деформации:
а – при шовной и *б* – при точечной сварке; 1 – зона интенсивной деформации; 2 – расплавленный металл

С другой стороны, деформация поверхностных слоев металла приводит к ускоренному износу роликов. Пластическая деформация может оказать благоприятное влияние на плотность шва. Так, при сварке последующих точек и повторном нагреве не-

сплошности (раковины) в предыдущих точках могут заполняться деформируемым в эти несплошности металлом.

При *рельефной сварке* отмечается интенсивная деформация (осадка) рельефа на первом и, особенно на втором этапе формирования соединений. При рельефной сварке в твердом состоянии стремятся обеспечить большую степень пластической деформации в радиальном направлении в контакте деталь-деталь, что способствует очистке поверхности и образованию металлических связей (рис. 1.29, *б*). Одновременно происходит деформация вдоль оси *z* и заполнение впадины под электродом. Обычно соединение в твердом состоянии образуется по кольцу по периферии контакта. Дальнейший нагрев металла приводит к образованию ядра по обычной схеме точечной сварки. Рельеф при этом полностью деформируется, но под электродами остаются небольшие вмятины [7, 9, 10].

1.6.4. Пластическая деформация при стыковой сварке сопротивлением

При стыковой сварке сопротивлением пластическая деформация необходима для создания электрического контакта и выравниванию соединяемых поверхностей ($\Delta_к$); удаление окислов из стыка и интенсификации процессов образования активных центров и последующей рекристаллизации в зоне соединения (Δ_0).

Величина $\Delta_к$ относительно не велика и достигается для сварки стержней из низкоуглеродистой стали при давлениях 20–40 МПа, при которой обычно происходит микропластическая деформация рельефа поверхности торцов.

Значение Δ_0 весьма значительно и при сварке стержней диаметром 20 мм из низкоуглеродистой стали составляет (10–15 мм). В общем случае образование физического контакта в результате удаления поверхностных пленок и выравнивания рельефа достигается в основном за счет пластического течения металла вдоль стыка под действием тангенциальных радиальных напряжений τ_r. Однако вследствие относительно малой температуры в контакте и затрудненных условий деформации площадь физического контакта деталей по отношению к площади сечения стыка после сварки $S_{кон}$ сравнительно невелика (50–70 %), несмотря на значительную степень деформации металла при осадке. В этих ус-

ловиях часть окислов остается в стыке. Применение же чрезмерно больших усилий осадки может привести к потере устойчивости деталей и снижению пластичности соединений, связанному с интенсивной деформацией и искривлением волокон.

Объемная пластическая деформация при стыковой сварке характеризуется отношением конечной площади сечения торцов после сварки ($S_{кон}$) к начальной до сварки ($S_{нач}$), называемым коэффициентом площади ($k_п = S_{кон}/S_{нач}$).

При мягких режимах сварки увеличиваются протяженность околошовной зоны $k_п$, при жестких режимах $k_п$ снижается, так как деформация локализуется на относительно коротком участке свариваемых деталей [7, 9, 10].

При сварке сопротивлением допускают значение $k_п \leq 4$.

При сварке оплавлением из-за относительно жесткого режима сварки и плавления металла качественное соединение без оксидов получают при $k_п < 2$.

1.6.5. Пластическая деформация при стыковой сварке оплавлением

Оплавление только подготавливает торцы к формированию соединения. Последнее осуществляется при осадке в результате пластической деформации. В момент фактического соприкосновения торцов они полностью покрыты слоем расплавленного металла. При сближении торцов, если этому не препятствуют пленки окислов, образуется объединенная прослойка металлического расплава. Такая же прослойка возможна и после вытеснения (жидких или твердых) окислов.

Твердый металл всегда смачивается своим расплавом, поэтому образование объединенной жидкой металлической прослойки без границы раздела уже гарантирует формирование здесь соединения при охлаждении, тем более что кристаллизация жидкой фазы на готовых центрах, имеющихся на оплавленной поверхности твердого металла, идет беспрепятственно.

В процессе дальнейшей осадки зазор по всей площади соединения постепенно закрывается, полностью или частично вытесняя расплавленный металл из стыка. В местах глубоких

кратеров, даже к концу осадки в стыке может остаться невытесненный, обычно окисленный литой металл в виде линзы. В зависимости от величины осадки металл сохраняет здесь литую структуру с присущими ей дефектами или подвергается заметной деформации.

На отдельных участках торцов к началу осадки или в момент их фактического соприкосновения жидкий металл может отсутствовать. Соединение формируется в твердой фазе (топохимический процесс). В результате деформации при осадке торцы должны быть доведены до физического контакта с вытеснением из стыка окислов, если они там имеются. Осадка обычно идет при температуре, близкой к солидусу, при которой обеспечивается значительная термическая активация, способствующая в сочетании с движущимися дислокациями образованию прочного соединения на участках, свободных от окислов. Однако даже на таких участках в случае недостаточного их нагрева при малой деформации, осуществляемой после достижения физического контакта, возможно формирование соединения без общих зерен, разрушение которого носит хрупкий межзеренный характер. Обычно при сварке оплавлением температура на торцах в момент осадки достаточно высока и основное препятствие к получению соединений высокого качества связано с окислением. Практически при сварке оплавлением сочетаются два процесса формирования соединения: через жидкую фазу (основной процесс) и в твердом состоянии.

Процесс осадки характеризуется двумя основными параметрами: ее величиной $\Delta_{ос}$ и скоростью $v_{ос}$. С ними связан третий – зависимый параметр – давление осадки $p_{ос}$. Минимальная величина осадки при наличии на торцах слоя жидкого металла равна:

$$\Delta_{ос}=\Delta_з+2\delta_р+2\kappa_0\Delta_{кр} \qquad (1.28)$$

где $\Delta_з$ – зазор между оплавляемыми торцами; $\delta_р$ – толщина слоя жидкого металла; $\Delta_{кр}$ – глубина кратера; κ_0 – коэффициент (κ_0=2–4).

Величина $\Delta_з+2\delta_р$ обычно не превышает 1–1,5 мм. Определяющим является третий член $2\kappa_0\Delta_{кр}$. Коэффициент κ_0 учитывает, что выравнивание выступов невозможно без общей деформации сдавливаемых тел. Чем уже зона интенсивного на-

грева, тем труднее деформировать прилегающий к торцам металл; выравнивание выступов при этом будет сопровождаться меньшей общей деформацией и коэффициент κ_0 снизится, а удельное давление, необходимое для ее осуществления, возрастет. Поэтому при сварке с подогревом или при непрерывном оплавлении по «мягкому» режиму с широкой зоной разогрева, как правило, необходимая величина осадки возрастает.

При увеличении $\Delta_{ос}$ улучшаются условия удаления расплавленного металла и окислов из стыка. Однако чрезмерная осадка может снизить пластичность соединения в результате резкого искривления волокон.

Скорость осадки оказывает значительное влияние на формирование соединения. При малой скорости увеличивается время закрытия зазора между деталями, в течение, которого расплавленный металл охлаждается, и удаление окисных пленок затрудняется.

Давление осадки определяется величиной и скоростью осадки. Давление осадки увеличивают при увеличении градиента температур и при сварке жаропрочных материалов [7, 9, 10].

Для лучшего формирования соединения и снятия наклепа часть осадки проводят при включенном токе. При этом уменьшается скорость кристаллизации металла на поверхности наиболее глубоких кратеров и облегчается деформация неровностей.

1.7. Удаление поверхностных пленок

Поверхностные пленки (оксиды, слои плакировки и др.), как правило, более тугоплавки (за исключением оксидов железа), чем свариваемые металлы или сплавы. В процессе сварки они должны быть разрушены и удалены с плоскости соединения двух деталей, так как, в общем случае, их наличие в конечной стадии процесса препятствует образованию металлических связей. Этот процесс относят к одному из основных при формировании сварных соединений.

В условиях ***точечной, рельефной и шовной сварки*** разрушить и перераспределить поверхностные пленки удается только при расплавлении металла в контакте двух листов. Разрушение и удаление указанных пленок происходит под действием опреде-

ленных сил, в основном электродинамических по своей природе. Результатом действия этих сил является интенсивное перемешивание жидкого металла ядра в направлениях, указанных стрелками на рис. 1.30.

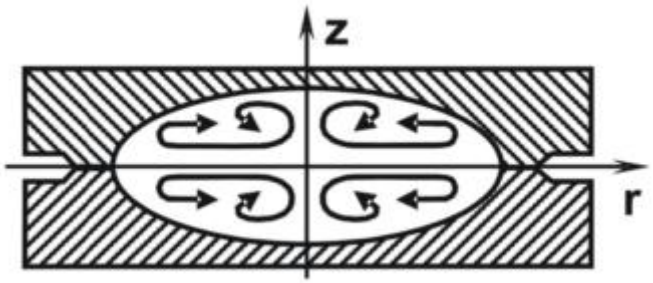


Рис. 1.30. Перемешивание жидкого металла ядра

Причинами перемешивания жидкого металла являются объемные силы, возникающие в результате взаимодействия сварочного тока с магнитным полем, созданного этим же током. Характер и направление действия этих сил могут быть определены при рассмотрении упрощенной модели процесса сварки (рис. 1.31).

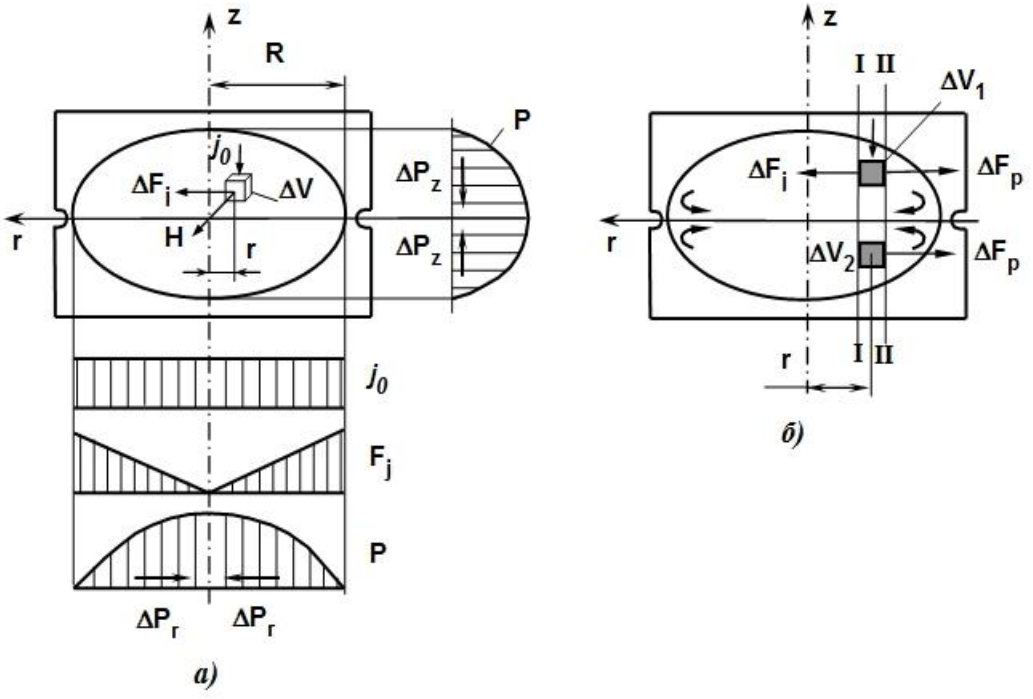


Рис. 1.31. Схема определения электродинамических сил:
а – эпюры распределения плотности тока j_0, сил F_j и давлений p в жидком металле по осям z и r; *б* – характер распределения сил, действующих на взвешенные в расплаве частицы

В предположении равномерного распределения плотности тока j_0 по сечению ядра сила ΔF_j, действующая на элементарный объем металла ΔV, находящийся на расстоянии r от оси z:

$$\Delta F_j = \mu_0 j_0 \Delta V H = \mu_a j_0^2 \Delta V r / 2, \qquad (1.29)$$

где $H=j_0 r/2$ – напряженность магнитного поля; μ_a – абсолютная магнитная проницаемость вещества.

Направление к центру ядра этой силы определяют по правилу левой руки.

Силы $\Delta \boldsymbol{F_j}$, действующие на все объемы ΔV ядра, создают в жидком ядре давление, подобное давлению, возникающему в жидкости от гравитационных сил. Силы $\Delta \boldsymbol{F_j}$ действуют также на объемы металла, находящегося в твердом состоянии, где они уравновешиваются силами сопротивления кристаллической решетки.

Объемные силы $\Delta \boldsymbol{F_j}$ имеют максимальное значение на периферии ядра и снижаются до нуля в центре ядра. Давление (в сечении контакта листов) описывается уравнением параболы (рис.1.31, *а*):

$$p = \mu_a j_0^2 (R^2 - r^2) / 4, \qquad (1.30)$$

достигая максимума в его центре (R – радиус ядра).

Как правило, литое ядро имеет форму эллипсоида, поэтому в расплавленном металле возникают градиенты давления не только в горизонтальном (Δp_r), но и в вертикальном (Δp_z) направлениях. Под действием этих градиентов слои жидкости циркулируют в указанных на рис. 1.30 направлениях. Незначительная асимметрия в расплавлении двух листов приводит к перемешиванию поверхностных пленок в расплаве.

На взвешенные в расплаве твердые (электропроводимые ΔV_1 или чаще неэлектропроводимые ΔV_2 – рис. 1.31, *б*) частицы пленок действуют силы ΔF_p, вызванные разностью давлений в сечениях *I–I* и *II–II*:

$$\Delta F_p = \Delta p_r \Delta V. \qquad (1.31)$$

Неэлектропроводимые частицы перемещаются и скапливаются на периферии литого ядра. Если плотность тока j_1 в электропроводимой частице ΔV_1 (рис. 1.31, *б*) больше плотности тока j_0 в расплаве, то на частицу будет действовать разность сил $\Delta F = \Delta F_p - \Delta F_j = \mu_0 (j_0^2 - j_1^2) r^2 / 4,$, под действием которой частица будет двигаться к центру ядра.

Таким образом, объемные электродинамические силы приводят не только к интенсивному перемешиванию расплава, замешиванию в нем поверхностных пленок, но и к сепарации частиц пленок в ядре в зависимости от их электропроводимости. Последнее явление использовано для неразрушающего контроля размеров литого ядра.

При ***стыковой сварке*** торцы открыты для взаимодействия с атмосферой. Наиболее активно развиваются процессы окисления при сварке сопротивлением. Для сварки оплавлением характерно непрерывное обновление металла на торцах, образование большого количества капель и паров металла в зазоре (например, при сварке сталей оксида углерода) при взрыве перемычек, связывающих кислород и другие газы, что значительно снижает интенсивность взаимодействия металла с атмосферой. Однако при соединении химически активных металлов (титана, молибдена и др.) такая защита может оказаться недостаточно эффективной, и сварку иногда выполняют в среде инертных газов. Условия разрушения и удаления оксидов при стыковой сварке зависят от температуры торцов, градиента температур, свойств оксидов и металлов. Трудность удаления оксидов при сварке сопротивлением возрастает с увеличением их твердости.

При стыковой сварке возможны следующие случаи:

1) сварка в твердой фазе при температуре плавления окисла, значительно превышающей точку плавления металла (например, Al); с ростом температуры твердость алюминия понижается, а твердость Al_2O_3 изменяется мало; уменьшение отношения твердости металла к твердости окисла ($H_{Me}/H_{ок}$) с нагревом может облегчить разрушение пленки;

2) сварка в твердой фазе, но при наличии легкоплавкого твердого окисла, например, при сварке низкоуглеродистой стали

T≈1200 °C, отношение $H_{Me}/H_{ок}$ неблагоприятно и разрушение пленки при пластической деформации затруднено;

3) сварка в твердой фазе, но с расплавлением легкоплавкой окисной пленки, например, сварка низкоуглеродистой стали при температуре выше точки плавления эвтектики Fe-FeO (1370 °C); жидкие окислы сравнительно легко удаляются из стыка;

4) сварка с оплавлением поверхности металла, но с образованием пленки твердого окисла (например, стыковая сварка оплавлением высокохромистых сталей, дающих тугоплавкую пленку $FeCr_2O_4$); удаление твердых окислов вместе с оплавленным металлом легче, чем удаление твердого окисла на твердом неоплавленном металле;

5) сварка с оплавлением металла и расплавлением окисла, например, при стыковой сварке оплавлением конструкционных сталей; окислы легко удаляются вместе с жидким металлом.

При сварке сопротивлением вследствие сравнительно малой пластической деформации происходит лишь частичное разрушение и удаление оксидов. Обновление поверхности (удаление с поверхности торцов оксидов) составляет при этом не более 60–70 %, что в общем случае определяет относительно низкую пластичность соединений [7, 9, 10].

При сварке оплавлением удаление оксидов значительно облегчается и происходит вместе с частицами расплавленного металла, выбрасываемого из стыка, и главным образом при осадке вытеснением оксидов с жидким и твердым металлом в грат. При сравнительно небольшой деформации обновление поверхности при оптимальном режиме сварки приближается к 100 %. Однако при этом необходимо учитывать, что на поверхности оплавленных торцов, как правило, имеются неровности, и, хотя осадку выполняют относительно быстро, для закрытия зазора $\Delta_з$ и полного удаления из стыка оксидов требуется определенное время Δt_1. При оплавлении между двумя последовательно образующимися на одном и том же месте перемычками проходит некоторое время Δt_2. Этот же интервал времени может быть между началом образования последней перемычки и фактической осадкой (моментом соприкосновения деталей). Таким образом, в течение

$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2$ может происходить остывание металла (например, на дне кратера) при незакрытом зазоре (рис. 1.32).

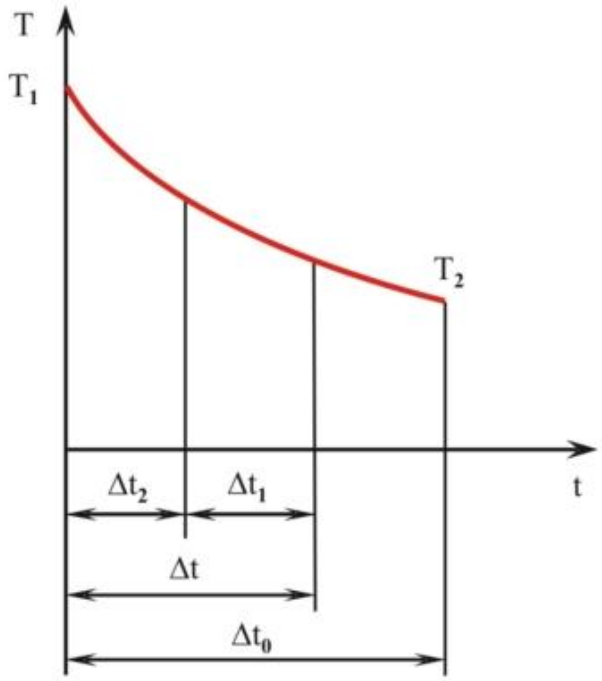


Рис. 1.32. Изменение температуры в стадии осадки

Интервал времени Δt_0, достаточный для охлаждения металла на торцах от T_1 (средней температуры существования перемычки) до T_2, будет определяться следующим уравнением:

$$\Delta t_0 = \delta_{ж} \gamma \left[c(T_1 - T_2) + m_0 \right] / \left[\lambda (dT / dx) \right], \qquad (1.32)$$

где $\delta_{ж}$ – толщина слоя расплавленного металла на торцах; T_2 – температура, при которой металл на поверхности торца теряет жидкотекучесть.

Числитель в уравнении (1.32) – количество теплоты, на которое уменьшается теплосодержание расплавленного слоя единичной площади при охлаждении и кристаллизации, а знаменатель – теплота, отводимая торцами в единицу времени за счет теплопередачи.

Таким образом, условием сохранения возможности удаления оксидов из стыка будет:

$$\Delta t_0 \geq \Delta t, \qquad (1.33)$$

Удаление оксидов облегчается при интенсификации процесса оплавления к концу сварки (увеличивается Δt_0 за счет увеличения $\delta_{ж}$ и снижения Δt_2 вследствие увеличения частоты пульсации f_n), при увеличении скорости осадки $v_{ос}$ (уменьшается Δt_1) и при задержке отключения сварочного тока при осадке $t_{ос}$ (уменьшается Δt_2). Увеличение $v_{ос}$ уменьшает время окисления поверхности торцов в период закрытия зазора.

На условие (1.33) в сильной степени влияют теплофизические свойства свариваемых металлов. Например, при сварке алюминиевых сплавов возникают трудности образования сплошного расплавленного слоя $\delta_{ж}$ из-за высокой теплопроводности металла. При оплавлении низкоуглеродистой стали, когда толщина расплавленного слоя к концу сварки достигает 0,1–0,3 *мм*, Δt_0=0,02–0,10 с.

1.8. Дефекты сварных соединений и причины их возникновения

К дефектам сварных узлов относится нарушение геометрических размеров и формы, заданных чертежом. Причинами этих дефектов могут быть сварочные деформации элементов узла, возникающие вследствие термомеханического воздействия на металл в процессе сварки; технологические деформации, связанные с работой оборудования, приспособлений и положением узла при сварке; дефекты собственно сварных соединений; несоблюдение геометрических размеров при сборке и прихватке деталей узла. Вопросы, связанные с деформациями при точечной и шовной сварке являются достаточно специфическими и сложными.

Известно, что стабильные свойства соединений, выполняемых **точечной, и шовной сваркой**, могут быть получены только при наличии зоны взаимного расплавления соединяемых деталей. Основными дефектами являются непровар, выплески, вмятины, несплошности зоны сварки (трещины, раковины, поры), снижение коррозионной стойкости соединений, неблагоприятные изменения структуры металла, хрупкость и нарушение герметичности.

Непровар – наиболее опасный дефект, так как внешнее его проявление не всегда заметно. Наиболее опасный и трудно выяв-

ляемый дефект, при котором зона взаимного расплавления меньше требуемой в чертеже изделия. Непровар может проявляться в виде полного отсутствия (рис. 1.33, *а*) или уменьшения (рис. 1.33, *в*) литого ядра, а также при частичном или полном сохранении оксидной пленки или плакирующего слоя в контакте деталь-деталь (рис. 1.33, *г* и *д*). Наиболее опасен непровар в котором образуется соединение в твердом состоянии (рис. 1.33, *б*) по микрорельефам поверхности. Такое соединение трудно выявить, оно может выдержать иногда относительно большие статистические срезывающие нагрузки и хрупко разрушится при небольших напряжениях отрыва и знакопеременных нагрузках [1, 7, 9, 10].

Общей причиной этого дефекта считают нарушение температурного поля, что может произойти вследствие изменение параметров режима сварки ($I_{св}$, $t_{св}$, увеличение $F_{св}$, $d_э$), а также других технологических факторов (малая нахлестка, расстояние между точками, большие зазоры), приводящие к снижению плотности тока (тепловыделения).

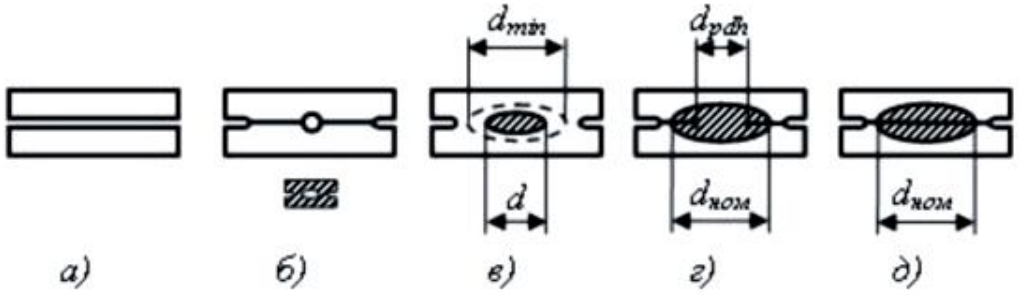


Рис. 1.33. Виды непроваров:
а – полное отсутствие проплавления; *б* – образование соединения по отдельным микрорельефам; *в* – малый размер ядра; *г* - недостаточный размер взаимного расплавления; *д* – полное отсутствие зоны взаимного расплавления

Для предупреждения непроваров следует обеспечить стабильность технологических факторов и работы сварочного оборудования, а также удалить перед сваркой тугоплавкие оксиды и плакирующий слой, препятствующий процессу образования зоны взаимного расплавления деталей.

Выплески – распространенный дефект сварки. Это выброс части расплавленного металла из зоны сварки (рис. 1.34). Их разделяют на наружные и внутренние. Наружный выплеск связан с

перегревом металла в контакте электрод-деталь. Внутренний выплеск может быть начальным или конечным. Начальный выплеск часто образуется при работе машин на скоростных режимах, особенно при включении тока асинхронными контакторами. Конечный выплеск связан с локальным образованием зазора в уплотняющем пояске. Выплески обычно увеличивают глубину вмятины, выявляются они внешним осмотром. Наружные выплески ухудшают внешний вид изделия. Внутренние выплески часто препятствуют дальнейшему росту ядра. Конечные выплески часто сопровождаются образованием трещин, раковин и глубоких вмятин поэтому считаются наиболее опасными. Причины выплесков: недостаточное усилие сжатия, большая сила сварочного тока и длительное его протекание, высокое контактное сопротивление, малое усилие сжатия, неправильная установка и заправка электродов. Общая причина появления этого дефекта состоит в отставании скорости деформации от скорости нагрева.

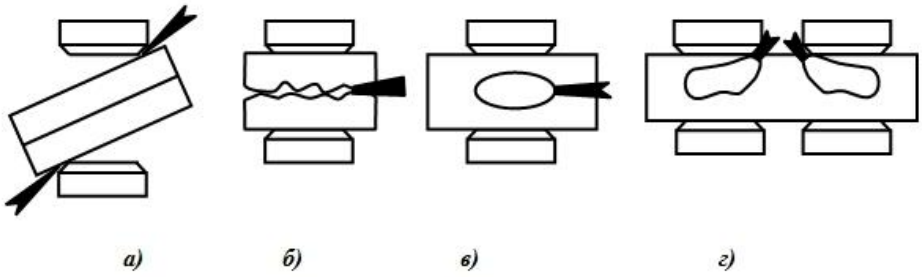


Рис. 1.34. Виды выплесков:
а – наружный; *б* – начальный внутренний; *в* – конечный внутренний;
г – конечный наружный при односторонней сварке

Образование конечного внутреннего выплеска связано с раскрытием зазора, вызванного тепловым расширением металла, потерей герметичности соединения и выбросом жидкого металла, находящегося под высоким давлением. Склонность к появлению данного дефекта можно оценить, используя коэффициент $k_в$, равным отношению критического $d_{кр}$ и минимально допустимого d_{min} диаметров ядер. Величина $d_{кр}$ – это максимальный диаметр ядра, который удается получить без выплеска за счет увеличения сварочного тока при постоянном усилии сжатия и времени протекания тока. Величина $k_в$ зависит от режима сварки и формы им-

пульса сварочного тока. Для увеличения $k_в$ используют мягкие режимы, предварительный подогрев отдельным или модулированным импульсом, униполярные импульсы низкочастотных машин и машин постоянного тока, режимы, близкие к полнофазному на машинах переменного тока.

Помимо этого предупредить раскрытие зазора и конечный выплеск удается путем повышения усилия на 15–20 % на конечной стадии цикла нагрева, размещение между деталями ленты или плакирующего слоя из пластичного металла.

Вмятины глубиной более 20–25 % толщины детали снижают прочность соединения. Этот дефект выявляется при внешнем осмотре и его легко замерить обычным индикатором со специальной стойкой. Причинами дефекта являются чрезмерное увеличение силы сварочного тока, времени сварки или малая рабочая поверхность электрода. Односторонние вмятины обычно возникают в результате износа нижнего электрода с развитой поверхностью, неправильной заправки рабочей поверхности электрода, нарушения соосности и параллельности рабочих поверхностей электродов.

Дефекты литой зоны сварного соединения – это трещины, рыхлости и усадочные раковины (рис. 1.35). Трещины образуются под действием растягивающих напряжений, возникающих в месте сварки вследствие неравномерного нагрева и интенсивного охлаждения. В этих условиях появляются в основном горячие трещины, они образуются в температурном интервале хрупкости (ТИХ). Основные причины возникновения трещин – слишком жесткий режим и несвоевременное приложение усилия проковки. В центре ядра возможно образование различных несплошностей (рыхлот, раковин). Причинами этого дефекта являются загрязнение поверхности и недостаточное усилие сжатия при сварке [6, 7].

При шовной сварке деталей толщиной 2–3 мм кристаллизация металла может частично или полностью происходить без внешнего давления, т. к. ролик уже переместился на шаг. При этом преимущественно образуются трещины, расположенные перпендикулярно к оси z.

При сварке последующей точки в зависимости от шага возможны следующие способы устранения дефектов: переплав металла предыдущей точки (при малом шаге или перекрытии более 50 %), заполнение несплошностей жидким металлом (при боль-

шем шаге или перекрытии 50 %) или заполнение этой несплошности нагретым металлом в результате его пластической деформации (большой шаг – перекрытие 30–40 %).

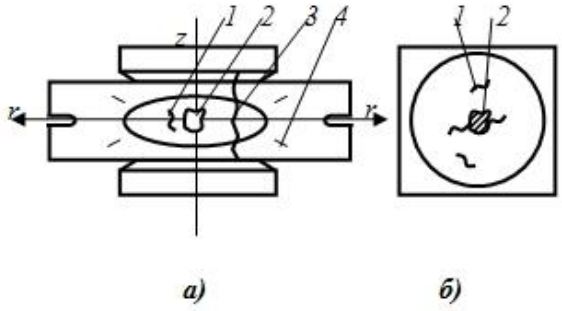


Рис. 1.35. Несплошности в зоне сварки:
а – расположение дефектов; *б* – схема рентгенограммы сварной точки;
1 – внутренние трещины; *2* – раковины; *3* – наружные трещины

Хрупкое соединение характерно для закаливающихся сталей. Закалка снижает пластичность соединения. Дефект распознается по характеру излома, который обычно происходит по сечению точки. Причина дефекта – слишком жесткий режим или выбор неправильного цикла термической обработки в электродах машины.

Негерметичность шовной сварки возникает при отклонениях параметров режима сварки. Слишком большая сила тока может привести к выплескам. Уменьшение силы сварочного тока, времени импульса и паузы приводит к уменьшению литого ядра. Перекрытие точек исчезает, и между точками появляются участки непровара, нарушающие герметичность. Контроль герметичности выполняют испытанием воздухом при избыточном давлении или другими способами.

Снижение коррозионной стойкости соединений возникает в результате переноса части электродного металла на поверхность вмятины и может вызвать усиленную коррозию в этой части соединения, особенно на сплавах, чувствительных к коррозии в контакте с электроположительными элементами, например, алюминиевых и магниевых сплавах в контактах с медью. Этот дефект называется в практике контактной сварки «загрязнением» поверхностей деталей. Следствием подобного изменения свойств является увеличение температуры в контакте с деталями как за счет повышения тепловыделения, так и снижения теплоотвода

(эффект теплового экранирования). Это явление приводит к росту объема расплавленного металла (глубины проплавления), что часто сопровождается образованием трещин, выходящих на поверхность деталей, и выплесков.

Таким образом, на определенной стадии процесса возникает необходимость периодической зачистки рабочей поверхности электродов для удаления продуктов взаимодействия, что снижает производительность процесса сварки. Момент зачистки обычно соответствует глубине проплавления 80–90 % и зависит от свойств металла и состояния поверхностей деталей и режима сварки. В качестве электрического параметра для оценки состояния поверхностей электрода может служить сопротивление $r_{эд}$.

Заметное снижение коррозионной стойкости соединений в основном характерно для химически активных металлов – сплавов на основе магния, алюминия, никеля, покрытий из алюминия и цинка.

Для уменьшения вероятности снижения коррозионной стойкости соединений следует принимать меры к торможению процессов массопереноса. К таким технологическим мероприятиям можно отнести следующее:

1. Тщательная подготовка поверхности деталей перед сваркой, желательно химическим способом, для удаления продуктов, содержащих влагу и способствующих вторичному окислению поверхности электрода.

2. Использование жестких режимов, сокращающих пребывание металла при повышенных температурах.

3. Применение предварительного обжатия деталей перед сваркой.

4. Нанесение на поверхность деталей барьерных веществ (минеральных масел), препятствующих массопереносу (схватыванию) и вторичному окислению электродов.

5. Интенсивное охлаждение электродов и роликов водой и в ряде случаев жидкими газами; использование электродных материалов с высокой теплопроводностью, например, технической меди при точечной сварке магниевых сплавов.

6. Удаление продуктов массопереноса с поверхности соединений после сварки путем зачистки ее металлическими щетками.

Неблагоприятные изменения структуры металла сварного соединения. Термодеформационный цикл сварки в зависимости свойств конкретного металла может вызвать образование гаммы неблагоприятных структур в шве и околошовной зоне сварного соединения.

Однако роль этих изменений в большинстве случаев относительно не велика из-за концентрации напряжений у границ шва, а также малой ширины зоны термического влияния и незавершенности процесса структурных изменений вследствие кратковременности нагрева.

Дефекты рельефной сварки и их причины в большинстве случаев те же, что и при точечной сварке. Однако в ряде случаев допускается рельефная сварка в твердой фазе. Большие пластические деформации, возникающие при осадке рельефа, стабилизируют прочностные показатели. Причинами дефектов рельефной сварки кроме нарушения параметров режима сварки может быть изменение размеров рельефов по высоте. В многорельефном соединении это нарушает равномерное распределение тока по рельефам, что приводит к перегреву отдельных рельефов, внутренним выплескам или к полному отсутствию соединения. При рельефной сварке один из электродов изнашивается быстрее. На его рабочей поверхности появляются лунки. На детали в этом месте образуется декоративный дефект в виде выпуклости. При увеличении выпуклости снижается прочность соединения.

Для Т-образных соединений типичны дефекты стыковой сварки сопротивлением.

Число и характер допустимых дефектов определяются техническими условиями или другими документами и зависят от ответственности конструкции, сварочного оборудования, материала детали и других обстоятельств.

Дефекты при стыковой сварке: непровар, рыхлоты, перегрев, трещины, искривление волокон, подгар поверхности в месте подвода тока.

Непровар выражается оксидными пленками, которые остаются в стыке. На изломе они видны в виде матовых пятен. Непровар существенно снижает прочность и пластичность соединений. Причинами этого дефекта может быть неустойчивое оплавление, выключение тока до начала осадки, недостаточное оплав-

ление, малая скорость осадки. При недостаточной осадке в стыке может оставаться невытесненный литой металл. Его кристаллизация сопровождается образованием усадочных рыхлот. Такие рыхлоты могут появляться и в околостыковой зоне на участке твердо-жидкого состояния.

Причина непровара при отсутствии оксидов – недостаточный нагрев торцов. В изломах таких холодных стыков наблюдается хрупкое межзеренное разрушение.

Рыхлоты обычно образуются в глубоких кратерах, в местах, заполненных расплавленным металлом. Кристаллизация этого металла сопровождается появлением усадочных дефектов – раковин в форме линз. При недостаточной осадке раковины могут возникать и околостыковой зоне на участке твердожидкого состояния металла.

Перегрев металла обычно вызывает укрупнение зерна в околошовной зоне и снижение пластичности соединения. Сильный перегрев может привести к пережогу. Причинами дефекта являются: слишком затянутый цикл оплавления, излишний подогрев деталей перед оплавлением, малая величина осадки, слишком большая длительность осадки под током.

Трещины при стыковой сварке могут быть двух видов: продольные и поперечные (кольцевые). Продольные трещины образуются при излишней осадке металла. Этот дефект образуется при перегреве места сварки. Кольцевые трещины обычно возникают при сварке закаливающихся материалов на слишком жестком режиме. Их образованию способствует упругая деформация деталей в зажимах вследствие отхода назад, подвижной плиты машины. К таким дефектам относят и расслоение – дефект металла, который раскрывается при осадке и имеет вид трещины.

Искривление волокон в области стыка обычно наблюдается при чрезмерной осадке металлов с резко выраженной анизотропией свойств. Это приводит к ухудшению работоспособности соединения.

Подгар поверхности детали образуется в месте подвода тока при плохой подготовке поверхности детали, недостаточном усилии зажатия или неправильной установке губок (электродов). Большое выделение теплоты в этом месте приводит к подплавлению поверхности. Если свариваемый металл подвержен закалке,

то в месте подгара возможно существенное повышение твердости, что осложняет последующую механическую обработку детали.

Для стыковой сварки также устанавливаются количество и размеры допустимых дефектов.

Исправление дефектов контактной сварки технологически обычно сложно и трудоемко. Точечная или шовная сварка по ранее сваренному месту возможна, но выполняется редко и на особо подобранных режимах. При этом способе исправления обычно трудно обеспечить соосность соединений. Чаще дефектную точку или шов исправляют сваркой дополнительных точек или наложением параллельного сварного шва. Исправление дефектного соединения способами сварки плавлением или пайкой почти всегда возможно, но трудоемко.

Глубокие вмятины на лицевых поверхностях исправляют пайкой или заполняют их пластмассой способом напыления. Дефекты стыковой сварки обычно невозможно исправить. При сварке кольцевых деталей иногда разрушают дефектное соединение и сваривают детали вновь [7, 9, 10].

Допустимость дефектов и необходимость их исправления зависит от степени ответственности данного соединения сварного узла (изделия) и указывается в ТУ и действующих технологических инструкций по сварке. В зависимости от вида, расположения и размера дефекта их исправляют повторной точечной или шовной сваркой; Обработкой резанием дефектного места и последующей газовой или дуговой электросваркой в среде защитных газов; сверлением отверстий и постановкой заклепок; зачисткой поверхности сварных швов; термической обработкой сварного узла. Дефекты сварных узлов (изменение формы и размеров) исправляют путем местного нагрева, постановки «холостых точек», прокаткой между стальными роликами, а также правкой ударом и обжатием.

Для своевременного предупреждения образования дефектов необходимо контролировать операции технологического процесса, предшествующие сварке: подготовку формы и поверхности деталей, сборку и прихватку. Контроль подготовки поверхности особенно важен при точечной сварке легких сплавов. Его выполняют измерением сопротивления холодных деталей, совмещенных, как при сварке, и сжатых заданным усилием.

2. ТЕХНОЛОГИЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

2.1. Технологический процесс изготовления сварных конструкций

2.1.1. Выбор способа сварки

Высокое качество сварных изделий обеспечивается совокупностью всех конструкционных и технологических решений. При проектировании сварной конструкции должна проводится тщательная отработка технологичности изделия. Она включает правильный выбор материала, размеров и формы деталей, рациональные способы изготовления, сборки, сварки узла, а также ряд других операций с установлением качества и точности выполнения и основное оборудование, приспособления и т. п.

Правильный выбор материала оказывает непосредственное влияние на качество и экономичность сварного узла. Наряду с высокими эксплуатационными характеристиками материал должен иметь хорошие технологические свойства: штампуемость, свариваемость и др.

Типовой технологический процесс производства сварных узлов состоит из ряда основных операций в определенной последовательности: изготовление деталей, подготовка свариваемых поверхностей, сборка, прихватка, сварка, правка и механическая обработка, антикоррозионная защита, контроль. Этот процесс корректируют в зависимости от масштаба производства, степени взаимозаменяемости деталей, материала, размеров, формы и ответственности узлов, а также особенностей производства: исключают, добавляют или меняют последовательность операций.

Точечной и шовной сваркой чаще всего соединяют детали толщиной 0,5–6 мм. Однако нижний предел (в микросварке) может доходить до 2 мкм, а верхний – до 30 мм. Толщина свариваемых деталей может быть одинаковой или различной (при соотношении толщин до 1:5, а в микросварке до 1:100 и более). Материал деталей может быть одноименным и разноименным (особенно в микросварке). Если герметичность не требуется, то применяют точечную сварку. Прочноплотные соединения выполняют шовной сваркой. При изготовлении емкости внутрен-

ние ребра выбирают тоньше обшивки для предупреждения разгерметизации при случайном разрушении точки.

Чаще применяют двустороннюю сварку, однако при ограниченном доступе к месту сварки – одностороннюю. Для повышения производительности и уменьшения коробления используют многоточечную сварку. Для создания слоев со специальными свойствами или ремонта изношенных деталей применяют электроконтактную приварку присадочного металла.

При проектировании сварной конструкции важно обеспечить удобный подход электродов к месту сварки, чтобы детали могли быть сварены на стандартном оборудовании прямыми электродами. Форма и размеры узлов для точечной, шовной и рельефной сварки весьма разнообразны: от простых плоских панелей до сложных пространственных конструкций (рис. 2.1).

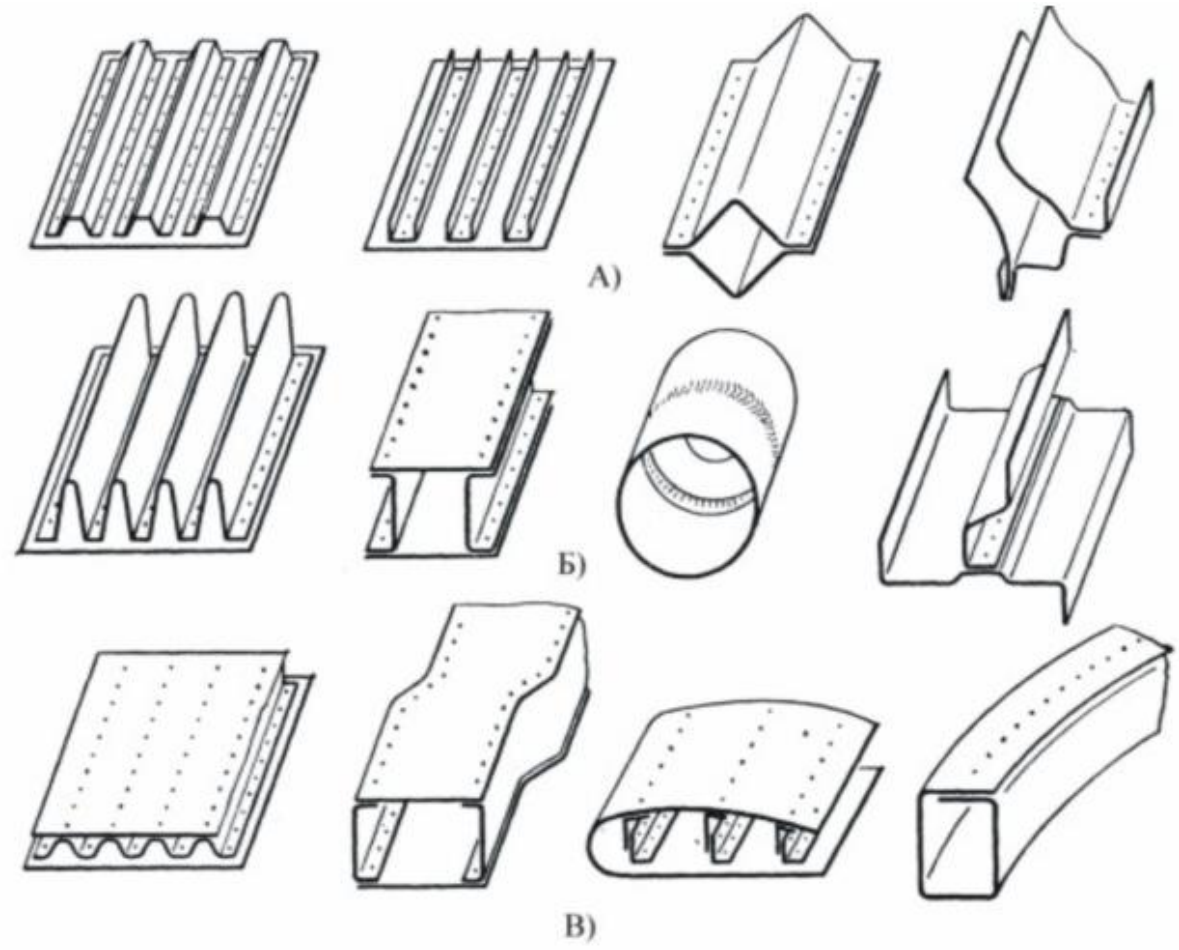


Рис. 2.1. Примеры узлов, соединяемых точечной и шовной сваркой

Наиболее технологичны узлы открытого типа *(а)*. Менее технологичны узлы полузакрытого типа *(б),* ухудшающие доступ одного из электродов. Наименее технологичны узлы закрытого типа *(в):* узлы коробчатой формы с внутренними швами, закрытые панели малой высоты и т. п. Детали для точечной и шовной сварки обычно изготовляют из листов и профилей. Выбор способа сварки обусловлен толщиной и материалом деталей, конструкцией узла, требованиями к качеству соединений, характером конкретного производства [9, 10].

Применение **рельефной сварки** позволяет увеличить производительность (одновременная постановка группы точек, соединение по всему контуру), уменьшить величину нахлестки и массу узлов (из-за ограничения области разогрева и пластической деформации), повысить стойкость электродов (вследствие увеличения размеров их рабочей поверхности), устранить разметку.

Значительное распространение получила рельефная сварка с формированием рельефа за счет сопряжения различных по форме деталей: острой грани гайки или штуцера с листом (контурная сварка, рис. 2.2, *а* и *б*), двух труб (Т-образная сварка, рис. 2.2, *в*), винта, проволоки с листом (рис. 2.2, *г* и *д*). Иногда рельефы изготавливают отдельно в виде колец, шайб, шариков.

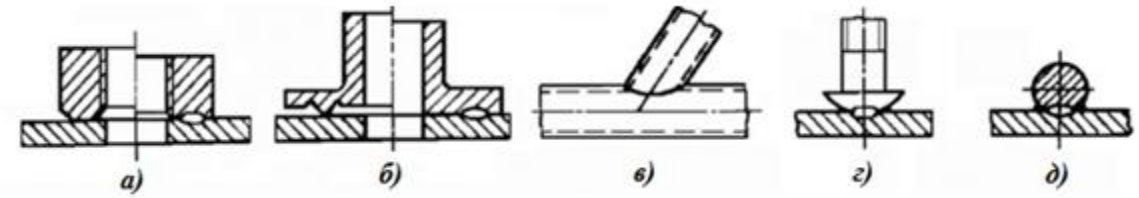


Рис. 2.2. Примеры узлов, выполненных рельефной сваркой

Стыковую сварку широко используют в промышленности (рис. 2.3) для изготовления длинномерных изделий из проката, сложных деталей из простых заготовок и деталей замкнутой формы в целях экономии легированных сталей (режущий инструмент, клапаны двигателей и др.).

Способ стыковой сварки выбирается в зависимости от формы и сечения деталей, марки металла, требований к качеству соединений.

Сваркой сопротивлением обычно соединяют детали небольшого, как правило круглого, сечения (не более 200 мм^2) из

низкоуглеродистых сталей, а также алюминия и меди (до 100 мм^2). Детали большего сечения сваривают по схеме принудительного формирования или в среде защитных газов.

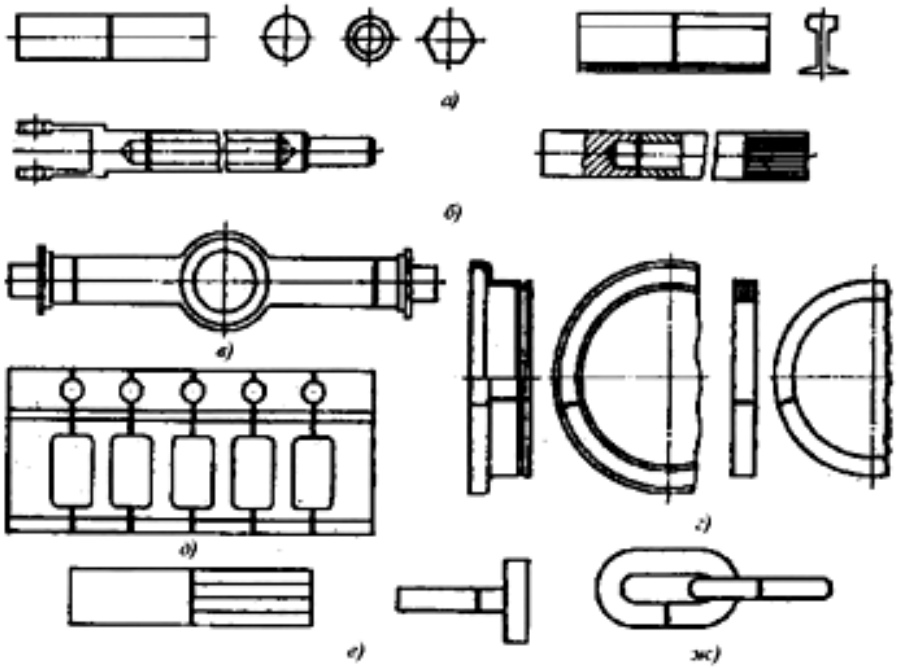


Рис. 2.3. Примеры узлов, выполненных стыковой сваркой:
а – длинномерные изделия компактного профиля, трубы, рельсы; *б* – тяги, валы; *в* – кожуха задних мостов автомобилей; *г* – блоки двигателя; *д* – ободья колес, кольца; *е* – режущий инструмент, клапана двигателей; *ж* - цепь

В связи с невысокой прочностью соединений (трудности удаления оксидов), необходимостью применения повышенной электрической мощности (высокая средняя плотность тока) и большими затратами труда на подготовку торцов сварка сопротивлением имеет относительно ограниченное применение.

Наиболее широко применяют сварку непрерывным оплавлением и оплавлением с подогревом. Сварка оплавлением обеспечивает высокое качество соединений при меньших затратах электрической мощности и трудоемкости на досварочные операции.

Непрерывным оплавлением сваривают детали с компактным сечением до 1000 мм^2 (из низкоуглеродистой стали) и детали несколько большего сечения с развитым периметром (трубы, листы и др.) [6, 12].

Область рационального применения сварки оплавлением с подогревом сопротивлением ограничивается сечениями 500–10000 мм^2. При больших сечениях неравномерность нагрева по сечению приводит к снижению стабильности качества соединений. Кроме того, резко возрастает необходимая мощность оборудования.

Детали с площадью сечения 5000–40000 мм^2 сваривают непрерывным оплавлением на машинах с программным управлением напряжением сварочного трансформатора и скоростью подачи подвижного зажима.

Высокой эффективностью обладает способ стыковой сварки импульсным оплавлением, который позволяет сваривать стальные заготовки сечением до 200 000 мм^2 и получать качественные соединения из различных трудносвариваемых металлов.

2.1.2. Выбор рациональной конструкции деталей и элементов соединений

При точечной, шовной и рельефной сварке в понятие «оптимальные размеры соединения» входит несколько измеряемых величин, называемых *конструктивными элементам соединения* (рис. 2.4). Они стандартизованы по ГОСТ 15878-79 для соединений двух групп А и Б. Группу устанавливают при проектировании узла в зависимости от требований, предъявляемых к сварной конструкции и исходя из особенностей технологического процесса. Соединения группы А имеют более высокие прочностные характеристики.

Основными конструктивными элементами являются расчетный (минимальный) диаметр ядра (для точечной и рельефной сварки) и ширина литой зоны (для шовной сварки). Их измеряют в плоскости сопряжения деталей и обозначают *d* для обоих случаев сварки. Эти размеры устанавливают из условия получения необходимой и стабильной прочности, герметичности шва при минимальной нахлестке. Фактический диаметр в узлах должен быть не меньше указанного ГОСТе.

Максимальные размеры ядра ограничивают из-за возможности имения различных дефектов, снижения стойкости электродов, устанавливая верхние пределы на 15–25 % больше мини-

мально допустимых (при $s \geq 0{,}5$ мм). Приближенно при толщине деталей $s \geq 0{,}5$ мм минимальный диаметр литого ядра для соединений группы А можно определить по эмпирической формуле: $d = 2s + (2–3$ мм). Более точные его значения, учитывающие уменьшение отношения d/s с ростом толщины, описываются формулой $d = 4s^{2/3}$.

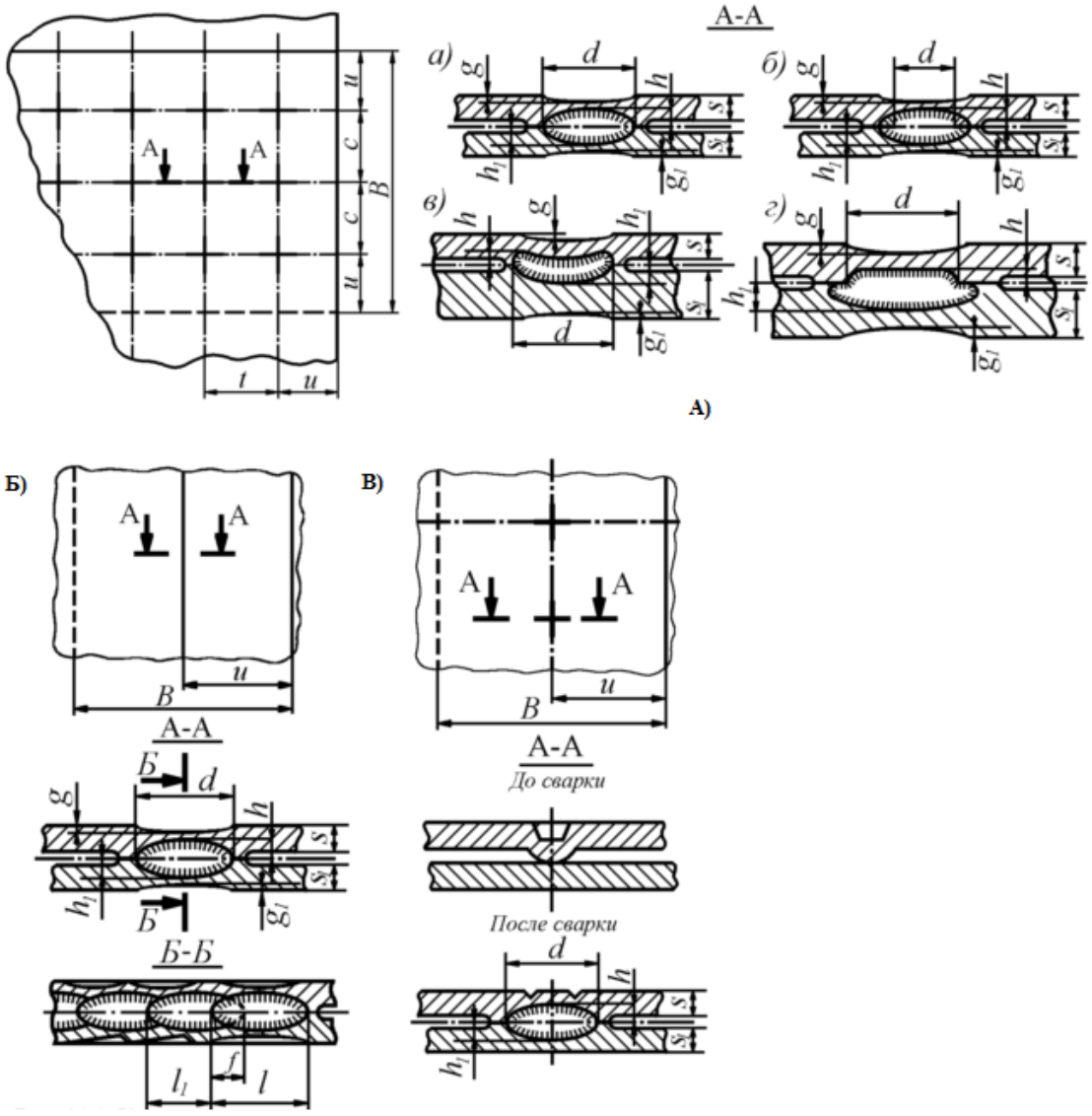


Рис. 2.4. Конструктивные элементы соединений, выполненные:
А) Точечной сваркой: *а* – неплакированные металлы, *б* – плакированные металлы, *в* – детали неравной толщины, *г* – разноименные детали;
Б) Шовной сваркой; В) Рельефной сваркой листов в нахлестку

Другими конструктивными элементами соединений являются величина проплавления, глубина вмятины от электрода, расстояние между центрами соседних точек в ряду (шаг), величина

перекрытия литых зон (при шовной сварке), расстояние от центра точки до края нахлестки, между осями соседних рядов точек и др.

Величина проплавления h ($h1$) в большинстве случаев должна находиться в пределах 20–80 % толщины детали. Ее измеряют отдельно для каждой детали. Минимальные значения соответствуют проплавлению тонкой детали при сварке деталей неравной толщины. На титановых сплавах верхний предел увеличивают до 95 %, а на магниевых – уменьшают до 70 % [6, 12].

Глубина вмятины g ($g1$) не должна превышать 20 % толщины детали, однако при сварке деталей неравной толщины и труднодоступных местах она может достигать 30 %. При микросварке глубина обычно не превышает нескольких процентов. Глухие вмятины ухудшают внешний вид и обычно уменьшают прочность точек.

Минимальное расстояние между центрами соседних точек в ряду или шаг $t_ш$ устанавливают из условия незначительного шунтирования тока при сохранении высокой прочности шва.

Величина перекрытия литых зон герметичного шва f должна составлять не менее 25 % длины литой зоны l (рис. 2.4, Б).

Минимальная величина нахлестки B – это наименьшая ширина сопрягаемой части соединяемых деталей без радиуса закругления соседних элементов (стенки, полки). При $r < 2s$ в нахлестку включают не только радиус, но и толщину стенки (рис. 2.4).

Расстояние от центра точки или оси шва до края нахлестки u должно быть не менее 0,5B. Расстояние между осями соседних рядов c выбирают на 20 % большим, чем $t_ш$.

Абсолютные размеры конструктивных элементов возрастают с увеличением толщины деталей. Некоторые из них (B, h) зависят и от материала; размеры $t_ш$, u, c также косвенно связаны с материалом деталей, так как из конструктивных соображений при изменении B меняют и эти величины. Например, при сварке легированных сталей несколько уменьшают $t_ш$, однако это не связано с меньшим шунтированием тока через соседнюю точку. Действительно, при уменьшении электропроводимости возрастают как сопротивление шунтирующей цепи, так и сопротивление зоны сварки. Условия шунтирования остаются практически постоянными. Величины B, $t_ш$, u, c, кроме того, зависят от соотношения толщины свариваемых деталей: при $s/s_1 > 2$ их увеличивают на

20–30 %. Вообще, при сварке деталей неравной толщины конструктивные элементы выбирают по более тонкой детали.

Высокий современный технический уровень машин и надежность аппаратуры позволяют в ряде случаев (при $s < 3$ мм) уменьшать d (на 22–33 %) и получать соединения, которые относят к группе Б. Для сохранения высокой прочности узла увеличивают число точек в ряду, уменьшая $t_ш$. При эксплуатации точки работают равномернее, с меньшей концентрацией напряжений; усталостные трещины несколько локализуются, замедляется их развитие. Из-за уменьшения B снижается масса соединений. Однако возрастают требования к точности изготовления деталей, сборки, подготовки поверхности, стабильности работы машин.

Торцы деталей, подлежащие ***стыковой сварке***, должны быть рационально сконструированы (рис. 2.5 и 2.6) [6, 12].

Во-первых, необходимо создать условия для равномерного нагрева и по возможности одинаковой пластической деформации при осадке.

Во-вторых (особенно при сварке сопротивлением), обеспечить защиту торцов от окисления и облегчить вытеснение окисленного металла из рабочей зоны шва.

В-третьих, форма деталей должна обеспечить надежное закрепление их в зажимах сварочной машины и токоподвод вблизи зоны сварки. Форму и размеры сечения торцов заготовок следует выполнять примерно одинаковыми. Различие в диаметрах не должно превышать 15 %, а по толщине 10 %.

Подготовка деталей к сварке заключается в получении определенной формы торцов, очистке их поверхности и поверхности деталей, правильной установке торцов перед началом сварки. Торцы деталей получают механической резкой на ножницах, пилах, металлорежущих станках, горячей или холодной высадкой на прессах, а также с помощью плазменной и газовой резки с последующим удалением шлака [6, 12].

Токоподводящие участки деталей и торцов очищают различными механическими способами и травлением.

При сварке сопротивлением (вследствие трудности обновления Поверхности) требуется более тщательная установка деталей при сборке, чем при сварке оплавлением. Так, зазор между торцами при сварке сопротивлением не допускается более 0,5 мм.

При сварке оплавлением он может быть большим (до 15 % $\Delta_{опл}$). При сварке развитых сечений требования к качеству сборки, в частности, к взаимной параллельности торцовых поверхностей деталей, ужесточаются.

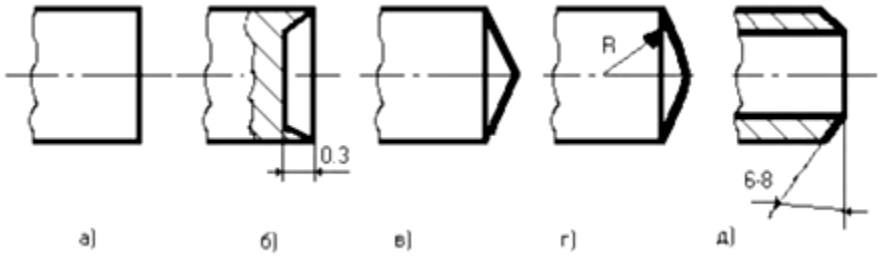


Рис. 2.5. Форма торцов деталей для сварки сопротивлением:
а – плоская поверхность (требует точной подготовки); *б* – кольцевой выступ (обеспечивает локальное тепловыделение и ограничивает поступление воздуха к стыку); *в–д* – конус или сфера (локализует нагрев)

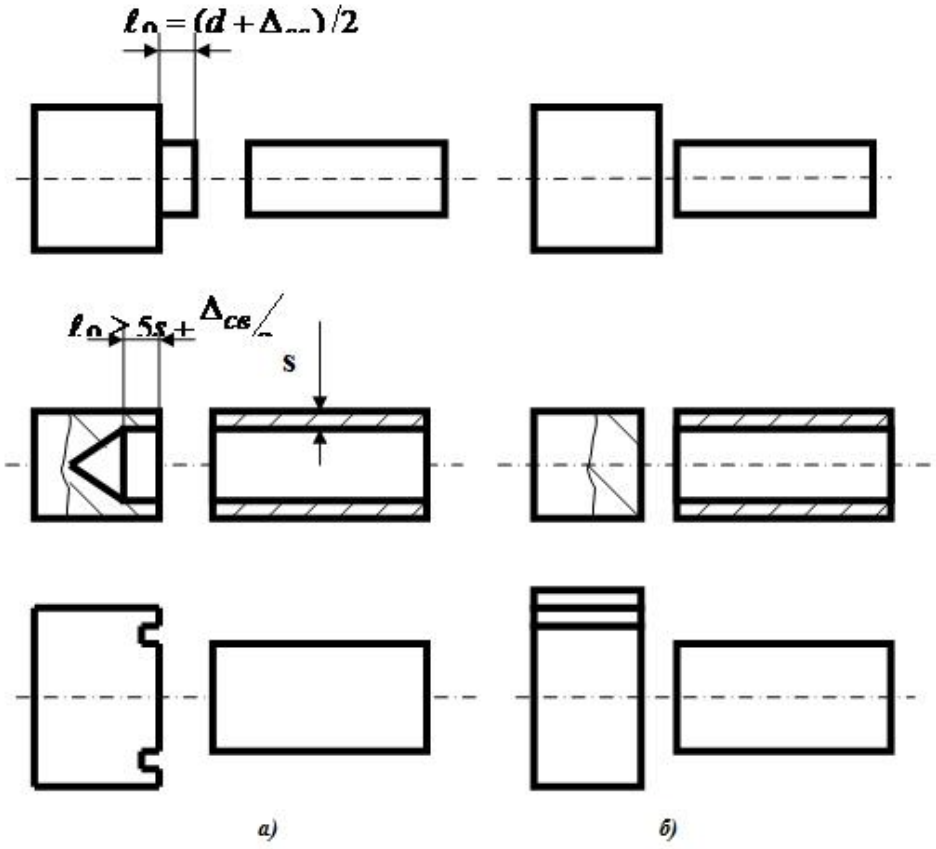


Рис. 2.6. Форма торцов деталей для сварки оплавлением:
а – рациональная, *б* – нерациональная
($\Delta_{св}$ – суммарное укорочение деталей при сварке)

2.1.3. Выбор рациональной формы и размеров рабочей поверхности электродов и роликов

Форма и величина рабочей (контактной) поверхности – параметры режима сварки, существенно влияющие на размеры и стабильность литого ядра, выбор остальных параметров режима. Форма рабочей поверхности должна соответствовать конфигурации наружной поверхности деталей. Для листовых плоских или слегка изогнутых деталей применяют либо плоскую (цилиндрическую) либо сферическую форму рабочей поверхности электродов и роликов. Ее размеры ($d_э$, $R_э$, $f_р$, $R_р$) не зависят от материала детали и электрода, но определяются толщиной детали (табл. 2.1). Для рельефной сварки цилиндрических деталей (например, проволоки) форма рабочей поверхности вогнутая с радиусом закругления, как у детали; для конусных деталей - конусная и т. п.

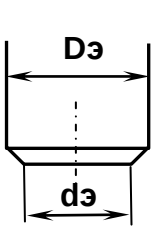
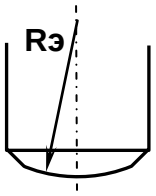
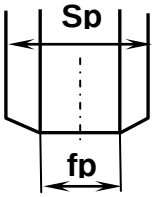
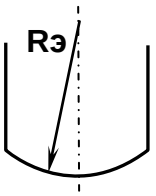
В процессе длительной эксплуатации рабочая поверхность под действием высоких температур и сжимающих усилий деформируется (сминается). Исходные формы и размеры несколько искажаются, меняются температурно-деформационные условия сварки. Скорость смятия зависит от многих факторов и является определяющей в понятии стойкости электродов. Исходный $d_э$ увеличивается, углы перехода конусной поверхности в плоскую притупляются, т. е. плоская рабочая поверхность закругляется. Исходный $R_э$ также возрастает и в пределе на сферической контактной поверхности может образоваться почти плоский участок. Однако из-за повышенного сопротивления деформации сферической рабочей поверхности такой участок образуется медленно, лишь в условиях продолжительной работы и, главным образом, на жаропрочных материалах (с большим $F_{св}$), при сварке на чрезмерно жестких режимах. Появление почти плоской площадки диаметром $d_э$ расценивают обычно как предельное состояние износа и, как правило, не допускают. Кроме того, регулярной заправкой электродов исходную сферическую форму периодически восстанавливают [6, 12].

Каждая из двух форм рабочей поверхности вносит свои особенности в формирование соединений, имеет преимущества и недостатки. Совокупность их в конечном итоге и определяет область применения той или иной формы.

Рабочая часть электродов со сферической формой поверхности более массивна, чем с плоской поверхностью и конусной заточкой. Площадь начального электрического контакта между сферической поверхностью электрода и плоской наружной поверхностью уменьшена. Рационально распределение во времени и по ширине контакта $F_{св}$ надежнее сжимает металл за пределами диаметра литого ядра. Поэтому склонность к выплескам и другим дефектам снижается, особенно при воздействии различных неблагоприятных факторов.

Таблица 2.1.

Рекомендуемые размеры электродов и роликов, мм*

Толщина детали	Размеры электродов			Размеры роликов		
	 			 		
	$D_э$	$d_э$	$R_э$	s_p	f_p	R_p
0,5	12	4	25–50	8	4	25–50
0,8	12	5	50–75	10	5	50–75
1,0	12	5	75–100	10	5	75–100
1,2	16	6	75–100	12	6	75–100
1,5	16	7	100–150	12	7	100–150
2,0	20	8	100–150	15	8	100–150
3,0	25	10	150–200	20	10	150–200
4,0	25	12	200–250	24	11	200–250

* При сварке алюминиевых сплавов $D_э$ увеличивают на 25%, S_p – на 25–50% и выбираются большие значения $R_э$, R_p.

Плоскую исходную форму рабочей поверхности с конусной заточкой применяют для металлов с повышенным сопротивлением деформации $\sigma_д^*$ (стали, жаропрочные сплавы); при среднем требовании к качеству (когда допускаются увеличенные вмятины, зазоры, отдельные выплески и т.п.); на машинах с вертикальным ходом электродов, большим полным сопротивлением вто-

ричного контура Z_2 и крутым фронтом нарастания сварочного тока (стационарные машины переменного тока) [2, 6, 12].

Сферическую исходную форму используют для металлов с пониженным $\sigma_д^*$ (алюминиевые, магниевые, медные, некоторые титановые сплавы); для металлов, склонных к горячим трещинам и раковинам и свариваемых с $F_к$ (алюминиевые, магниевые сплавы, другие сплавы большой толщины); при высоких требованиях к качеству (минимальные вмятины и зазоры, недопущение выплесков и других дефектов); при односторонней сварке и соединении металлов разной толщины, из разнородных сплавов; на машинах с любым ходом электродов, в том числе на клещах; на машинах с малым Z_2 и плавным фронтом нарастания $I_{св}$ (низкочастотных, с выпрямлением тока во вторичном контуре).

2.1.4. Изготовление деталей

Качество изготовляемых деталей непосредственно влияет на трудоемкость и качество сборки, прихватки, сварки. В большинстве случаев увеличенные зазоры и плохое сопряжение деталей возникают именно из-за низкой точности их изготовления.

Заготовки из листа вырезают на гильотинных, дисковых, вибрационных ножницах, в штампах, газовым пламенем, плазменной струей. Для автоматического раскроя листов из титановых сплавов, жаропрочных сталей применяют лазеры. Профили разрезают на пресс-ножницах, пилами.

Формообразование деталей выполняют обычно холодной деформацией: гибкой во вращающихся валках, свободной гибкой, обтяжкой, вытяжкой, выдавливанием, штамповкой. Хрупкие металлы деформируют с подогревом, особо крупные тонкостенные детали (днища, оболочки) изготовляют высокоскоростной обработкой, например, взрывом [6, 12].

2.1.5. Подготовка поверхности

Цель этой операции – удаление исходных толстых, неравномерных по свойствам поверхностных пленок. В результате по-

вторного окисления возникают новые, тонкие с малым и стабильным контактным сопротивлением, пленки.

Способы подготовки поверхности различны. В наиболее полном виде они включают несколько последовательных операций: обезжиривание, удаление исходных, в основном оксидных, пленок, пассивирование, нейтрализацию, промывку, сушку, контроль.

Обезжиривание служит для удаления загрязнений, масла, маркировочной краски протиркой растворителями либо в ваннах различного состава: содовых растворах (для легированных сталей и титановых сплавов), щелочных растворах (для алюминиевых и магниевых сплавов). С целью ускорения процесса в ванну иногда вводят ультразвуковые колебания. В автомобильной промышленности холоднокатаную сталь сваривают часто вообще без подготовки поверхности (тонкий слой масла мало влияет на формирование точек); латуни – после обезжиривания.

Удаление оксидных пленок – трудоемкая операция, так как оксиды химически связаны с металлом. Обычно их удаляют механической обработкой или химическим травлением.

Механическую подготовку проводят дробеструйной обработкой или металлическими щетками. Дробеструйную обработку применяют главным образом для стальных деталей с толстой оксидной пленкой (после термообработки, горячей деформации и т. д.) или с особыми поверхностными слоями; для титановых сплавов – с окалиной TiO_2, реже для других металлов. Дробь изготовляют в виде частиц отбеленного чугуна, мелконарезанной стальной проволоки, а для алюминиевых сплавов - стеклянных шариков.

Зачистку вращающимися щетками используют для деталей из любых металлов, но чаще из сталей (в том числе жаропрочных, высокопрочных) при малых масштабах производства.

Иногда механическую обработку применяют для алюминиевых и магниевых сплавов. Однако во избежание глубокого повреждения металла ограничивают силу прижатия вращающихся щеток, лимитируют диаметр и длину проволочек (не более 0,2 мм и не менее 40 мм соответственно).

Такая зачистка поверхности активизирует повторное окисление, поэтому в зависимости от условий хранения детали из алюминиевых и магниевых сплавов должны быть сварены не позднее чем через 5–20 ч. после обработки.

Химическое травление находит широкое применение, как в единичном, так и массовом производстве практически для любых металлов. После такой обработки возникает более равномерная и менее активная пленка. Появляется возможность управлять ее свойствами и скоростью последующего роста [6, 12].

Химическое травление осуществляют в щелочных и кислотных растворах с различными добавками для регулирования скорости травления, улучшения взаимодействия с поверхностью деталей, пассивирования поверхности. Наиболее тщательно обрабатывают поверхность алюминиевых и магниевых сплавов при производстве летательных аппаратов.

Для алюминиевых сплавов используют растворы ортофосфорной кислоты с добавками калиевого или натриевого хромпика. Ортофосфорная кислота почти не взаимодействует с алюминием, но активно растворяет поверхностные оксиды. Если необходимо глубокое травление (например, снятие плакирующего слоя на сплаве АМг6), обработку ведут в горячем щелочном растворе. Однако поверхность активируется, и за короткое время (одни сутки) вновь возникает толстая оксидная пленка.

Алюминиевые и магниевые сплавы требуют дополнительной химической обработки для уплотнения и стабилизации новой оксидной пленки, ее пассивирования. Детали из алюминиевых сплавов пассивируют одновременно с травлением, вводя в травящий раствор хромпик. Магниевые сплавы пассивируют после травления, обрабатывая в растворе хромового ангидрида (Cr_2O_3).

Для небольших деталей ответственного назначения из коррозионно-стойких и жаропрочных сталей и сплавов, тугоплавких металлов и медных сплавов иногда применяют электролитическое травление и полирование.

После химического или электролитического травления часто необходима нейтрализация, т. е. удаление с поверхности продуктов реакции или электролита. Эту операцию называют также осветлением поверхности.

Между каждыми операциями химической обработки детали промывают обычно в горячей, а затем в холодной воде с водородным показателем pH = 6,5–7,5. Особо ответственные узлы окончательно промывают опресненной водой. Детали сушат горячим воздухом или в сушильных шкафах [6, 12].

Обезжиривание, химическую обработку, промывку, сушку ведут в изолированном помещении с усиленной приточно-вытяжной вентиляцией и бортовыми отсосами у ванны. Детали транспортируют, загружают и вынимают механическими подъемниками. При большом масштабе производства подготовку поверхности проводят в специальных автоматизированных машинах струйным методом.

Качество подготовки поверхности оценивают визуально сравнением с эталонными образцами и измерением электрического сопротивления двух сжатых образцов $r_{ээ}$. Электросопротивление измеряют микроомметром типа Ф-412 или другими приборами на установках типа машины для точечной сварки с изоляцией одного из электродов. Усилие сжатия и размеры рабочей поверхности электродов выбирают, как при точечной сварке, в зависимости от толщины и материала деталей.

Для сталей и титановых сплавов достаточно визуального контроля: поверхность деталей должна быть матовой или иметь равномерный металлический блеск. Однако в спорных случаях измеряют электросопротивление. Для деталей из алюминиевого сплава визуального контроля недостаточно и в обязательном порядке измеряют электросопротивление $r_{ээ}$. Сразу после обработки деталей из сплавов Д16Т, В95Т, АМг6 $r_{ээ}$ не превышает 40–60 мкОм, а деталей из сплавов АМг, АМц, САП, АБМ, ВКА-1 – 30–40 мкОм. В течение 4–5 суток $r_{ээ}$ медленно повышается до 100–120 мкОм. Без пассивирования $r_{ээ}$ растет в 4–5 раз быстрее. Магниевые сплавы после пассивирования сохраняют низкое значение $r_{ээ}$ в течение 8–10 суток.

2.1.6. Сборка

Сборка должна обеспечивать точное взаимное расположение деталей (в соответствии с чертежом) и минимальные зазоры между ними. Качество и трудоемкость сборки зависят от точности изготовления деталей, степени их взаимозаменяемости, а также механизации процесса.

При отсутствии взаимозаменяемости детали подгоняют. Эта сложная и трудоемкая операция выполняется рабочим высокой квалификации. Поверхность деталей неизбежно загрязняется. Поэтому вначале требуется предварительная сборка узла с подгон-

кой. Затем узел разбирают, подготовляют поверхность, после чего выполняют окончательную сборку. На последнем этапе никакие подгоночные операции не допускают.

Минимальные зазоры – важнейшая предпосылка высокого качества соединений. При сварке с большими зазорами и в особенности деталей с повышенной жесткостью часть сварочного усилия тратится на устранение этих зазоров. Площадь контакта электрод-деталь и фактическое сварочное усилие уменьшаются. Плотность тока под электродами снижается, а в контакте между деталями возрастает. Одновременно усиливаются склонность к выплескам и к непровару.

Допускаемые сборочные зазоры зависят от способа сварки, жесткости узла (толщины и формы деталей), а также от длины участка с этими зазорами. Чем жестче деталь и короче участок, тем меньше допускаемые зазоры. Например, при точечной сварке деталей из сталей толщиной 1 мм зазоры должны быть не более 0,4 мм на длине 100 мм и не более 1,2 мм на длине 300 мм. Для толщины 3 мм эти значения уменьшаются соответственно до 0,3 и 0,9 мм.

Сборку выполняют по разметке, по эталонному узлу, с применением шаблонов, по сборочным отверстиям, в специализированных приспособлениях. Механизация, использование приспособлений повышают производительность сборки и ее качество.

По окончании сборки размечают места прихватки и сварки. Способы разметки различны: карандашом с помощью шаблонов или мерительного инструмента, приклеиванием рядом с нахлесткой заранее размеченной (типографским способом) липкой бумажной ленты. Эффективны оптические или механические разметчики на точечной машине, обеспечивающие заданное расстояние между точками. Часто сваривают и без разметки [6, 12].

Качество сборки оценивают, контролируя основные размеры узла, точное взаимное расположение деталей и зазоры. Зазоры можно измерять автоматически специальным прибором в процессе прихватки или сварки.

2.1.7. Прихватка

Прихватка служит для точного фиксирования деталей в узле, предотвращения их смещения при сварке, повышения жестко-

сти узла, уменьшения зазоров и снижения остаточных деформации. Чаще всего собранные узлы прихватывают точечной сваркой на стационарных машинах; тонколистовые детали сложной формы и больших размеров – в приспособлениях (стапелях) с помощью передвижных контактных машин (клещей, пистолетов) или аргонодуговой сваркой; крупные толстостенные узлы – аргонодуговой, ручной дуговой сваркой с последующим вырубанием мест прихватки [6, 9, 10, 12].

Шаг прихватки зависит от марки сплава, толщины деталей, жесткости узла, зазоров и вида сварки. Чем меньше зазоры и больше жесткость узла, тем больше может быть шаг. Для точечной сварки шаг прихваточных точек обычно составляет 100–300 мм, для шовной в 3–5 раз меньше (во избежание сильного коробления и «набегания» металла).

Под точечную сварку детали прихватывают по линии шва, режим прихватки устанавливают аналогичным сварочному. Под шовную – прихваточные точки располагают либо по оси, либо рядом, а их диаметр устанавливают меньше ширины шва (2,5s).Рациональная последовательность прихватки позволяет уменьшить сварочные деформации. Протяженные швы рекомендуется прихватывать от центра к краям попеременно, начиная с участков повышенной жесткости. Обечайки для более равномерного распределения сборочных зазоров прихватывают попеременно точками, расположенными диаметрально противоположно. Если зазоры оказываются большими, то обечайки из высокопрочных сплавов, можно прокатать стальными роликами.

Простые узлы, жестко зафиксированы в сборочно-сварочных приспособлениях, обычно сваривают без прихватки в этих же приспособлениях. Часто она оказывается излишней при многоточечной сварке. После прихватки контролируют качество прихватных точек, зазоры между деталями, общие размеры узла.

2.2. Параметры режима контактной сварки

Обеспечение высокого качества сварки и максимальной производительности процесса для данной толщины, формы и материала изделия определяется правильностью выбранного режима сварки [6, 9, 10, 12].

Для каждого материала, толщины деталей можно найти некоторый оптимальный режим, который обеспечивал бы получение соединений необходимого качества, т.е. нужных размеров и прочности, без недопустимых дефектов, с минимальными структурными изменениями и короблением, с сохранением антикоррозионных и других свойств. Этот режим должен одновременно обеспечивать высокую стойкость электродов, необходимую производительность, минимальную трудоемкость и т.п. При выборе такого режима необходимо учитывать особенности процесса сварки и свойства свариваемых материалов.

2.2.1. Влияние свойств свариваемых металлов на выбор параметров режима контактной сварки

Существенное влияние на режим сварки оказывают многие теплофизические, физико-химические и механические свойства металлов, тип и параметры кристаллической решетки, интервал кристаллизации и температурный интервал хрупкости, свойства оксидных пленок и др.

Удельное электросопротивление ρ_0 во многом определяет сварочный ток и тип машины. Чем меньше ρ_0, тем больше должен быть $I_{св}$. Например, при сварке алюминиевых сплавов требуются токи значительно большие, чем при сварке сталей.

Коэффициент теплопроводности λ и связанный с ним коэффициент температуропроводности а обусловливают рассеяние теплоты в околошовной зоне, протяженность последней, а также температуру в контакте электрод-деталь. С увеличением λ уменьшают $t_{св}$, используют более жесткие режимы.

Температура плавления сплава ($T_{пл}$) влияет на затраты теплоты, на значение $I_{св}$, а также на температуру в контакте электрод-деталь и интенсивность массопереноса.

С увеличением коэффициента линейного расширения α и условного сопротивления пластической деформации $\sigma^*_д$ металла повышается склонность к внутренним выплескам, возрастает уровень остаточных напряжений и деформаций. При сварке металлов с большими значениями $\sigma^*_д$ приходится резко увеличивать $F_{св}$, устанавливать более мягкий режим [6, 9, 10, 12].

Интервал кристаллизации и температурный интервал хрупкости (ТИХ) определяют склонность к образованию горячих трещин. Чем шире ТИХ, тем выше склонность к горячим трещинам. Тип и параметр кристаллической решетки, температура плавления определяют сродство при сварке разнородных сплавов, конечную структуру и свойства металла ядра.

Некоторые металлы изменяют свои свойства с ростом температуры (ρ_0, λ, a). Поэтому нередко вводят предварительный подогрев дополнительным импульсом тока (для повышения ρ_0, уменьшения λ и a). Это позволяет снизить сварочный ток и облегчить формирование соединений. Электрические и физико-механические свойства поверхностных пленок влияют на тепловыделение в контактах и массоперенос.

2.2.2. Режимы точечной, рельефной и шовной сварки. Влияние параметров режима сварки на прочность сварной точки

Режимом сварки называется совокупность электрических, механических и временных параметров, обеспечиваемых сварочным оборудованием и необходимых для получения качественного сварного соединения.

Параметры режима выбирают по таблицам, номограммам, рассчитывают или устанавливают опытным путем. Выбранные или расчетные режимы проверяют и уточняют для конкретных условий.

К основным параметрам режима сварки относят:

При точечной сварке: сила сварочного тока – $I_{св}$, время сварки – $t_{св}$, сварочное усилие – $F_{св}$, ковочное усилие – $F_к$, время проковки – $t_к$, а так же размеры рабочей поверхности электродов ($R_э$, $d_э$).

Шовной сварке: $I_{св}$, $t_{св}$, $F_{св}$, время паузы – $t_п$, скорость вращения роликов – $\nu_{св}$, а также размеры рабочей поверхности роликов ($f_р$, $R_р$, $D_р$). При шаговой шовной сварке с проковкой – дополнительно $F_к$, $t_к$, а также длительность перемещения и остановки роликов.

Рельефной сварке: $I_{св}$, $t_{св}$, $F_{св}$, а также диаметр и высота рельефа ($d_р$, $h_р$).

При этих способах сварки режим должен обеспечить заданные по ГОСТ 15878-79 размеры литого ядра (d, h) в зависимости от толщины свариваемых деталей. Величину сварочного тока можно рассчитать по закону Джоуля-Ленца:

$$I_{св} = \sqrt{\frac{Q_{пол}}{mR_{св}t_{св}}}, \qquad (2.1)$$

Полное количество теплоты, выделенное в зоне сварки зависит от свойств свариваемого материала, толщины деталей и времени сварки. Детальный расчет $Q_{пол}$ приведен в первой части учебного пособия п.1.3.1.

При данных способах сварки основное количество тепла выделяется за счет собственного сопротивления, поэтому в расчетах принимают $R_{св} = 2R_{д.гор}$ (см. п.1.2.4 первой части).

Изменение времени включения сварочного тока и изменение его величины оказывают влияние на размеры и прочность сварной точки. Это позволяет в известной мере компенсировать одно другим, т.е. допускает возможность получения одинаковой прочности при снижении времени включения тока, но при условии применения тока большей величины [6, 8, 10, 12].

На рис. 2.7 показана зависимость прочности сварной точки от времени включения сварочного тока для серии образцов из низкоуглеродистой стали толщиной 1 мм (кривая I) и низколегированной стали толщиной 5 мм (кривая II). Аналогичные зависимости получаются при сварке образцов с постепенным увеличением сварочного тока. Каждая из кривых имеет участок АВ, соответствующий сварке без расплавления, и участок ВС, соответствующий сварке с образованием литого ядра. Размеры ядра увеличиваются с увеличением времени включения тока (или сварочного тока). Максимальный диаметр, ядра $d_я$ связан с диаметром контактной поверхности электрода $d_э$ зависимости d_T=(0,9…1,4)·$d_э$. Дальнейшее увеличение диаметра ядра невозможно, так как оно сопровождается значительным выплеском металла и глубоким вмятием поверхности деталей, понижающих прочность соединения. Отношение диаметра ядра к диаметру электрода может быть тем больше, чем больше толщина свариваемых деталей и время включения тока.

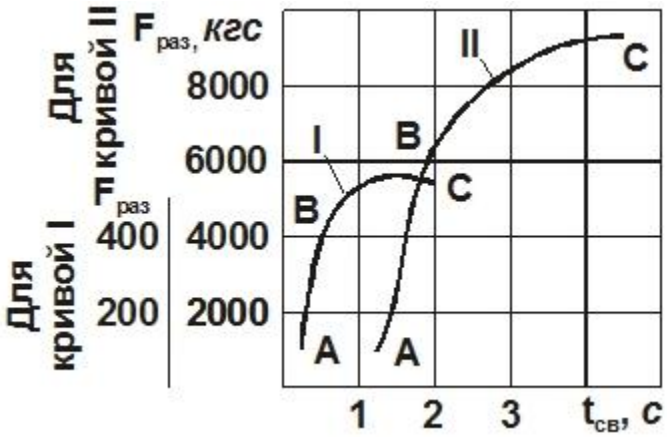


Рис. 2.7. Зависимость разрушающей нагрузки сварной точки от времени сварки низкоуглеродистой стали толщиной 1 мм (I) и низколегированной стали толщиной 5 мм (II)

Сварные точки стабильной прочности, т.е. точки, дающие при их испытании небольшой разброс разрушающих усилий, могут быть получены только при сварке с расплавлением, так как при сварке без расплавления на участке АВ незначительные изменения времени включения тока или других параметров (неизбежные в производственных условиях) вызывают существенные изменения прочности сварной точки. Наилучшие результаты по стабильности дают режимы, приближающиеся к точке С. Снижение прочности при переходе за точку связано с перегревом металла и значительным вмятием свариваемых деталей.

Время протекания тока (c) при сварке низкоуглеродистой стали принимается (0,1–0,2)s – на жестком режиме и (0,2–0,4)s – на мягком (s – толщина одной детали, мм).

Ориентировочно необходимую величину сварочного тока можно оценить по следующей зависимости:

$$I_{св} = jF_э, \qquad (2.2)$$

где j – плотность тока, А/мм^2; при сварке низкоуглеродистой стали обычно принимают 200÷400 А/мм^2 для жестких режимов и 80÷160 А/мм^2 – мягких; $F_э$ – площадь контактной поверхности электрода, мм^2.

Для шовной сварки величину сварочного тока увеличивают на 15–20 % по сравнению с точечной из-за шунтирования тока через ранее сваренные точки.

Скорость сварки (м/мин) выбирают с учетом требуемого перекрытия точек f и расстояния между ними $t_ш$:

$$I_{св} = \frac{0,06 t_ш}{t_{св} + t_п}, \qquad (2.3)$$

где $t_ш = l(1\text{-}f/l)$; $t_{св}$ и $t_п$ – соответственно длительность импульса тока и паузы (с).

При точечной и шовной сварке часть вторичного тока может протекать (шунтироваться) вне зоны сварки. Чаще всего он проходит через ранее сваренные точки (рис. 2.8) или через случайные контакты между деталями или между деталью и боковой (не рабочей) поверхностью электрода. Общий ток в сварочной цепи I_2 равен сумме сварочного тока $I_{св}$ и тока в шунте $I_ш$:

$$I_2 = I_{св} + I_ш, \qquad (2.4)$$

Следовательно, сварочный ток будет уменьшаться на величину тока шунтирования:

$$I_{св} = I_2 - I_ш, \qquad (2.5)$$

Ток шунтирования через раннее сваренную точку можно рассчитать по формуле:

$$I_ш = I_{св} \frac{r_{ээ}}{r_ш}, \qquad (2.6)$$

где $r_{ээ}$ и $r_ш$ – электрическое сопротивление зоны сварки и шунта.

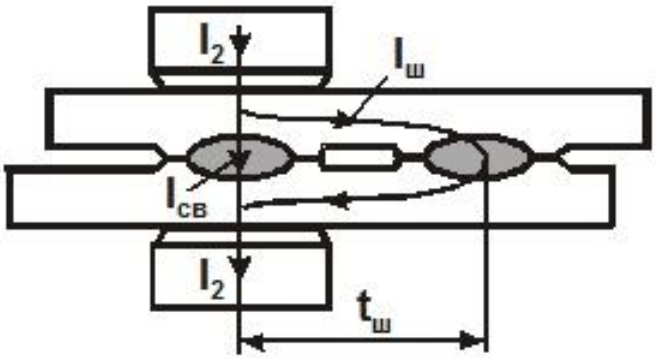


Рис. 2.8. Схема шунтирования тока через ранее сваренную точку

При шунтировании через смежную точку, расположенную на расстоянии $t_ш$ в деталях толщиной s с удельным электросопротивлением ρ:

$$r_ш = K_э \frac{2\rho t_ш}{s b_{пр}}, \qquad (2.7)$$

где $b_{пр}$ – приведенная с учетом растекания тока ширина шунта, равная $(d_к + d_п)/2$; $K_Э \approx 0{,}4$.

Как следует из вышеприведенных формул, уменьшение $t_ш$ и рост s вызывают снижение $I_{св}$ и соответственно размеров ядра, а также приводят к повышению температуры в контакте электрод – деталь и скорости износа электрода. Для каждой толщины и марки металла обычно выбирают минимальное значение $t_ш - t_{ш\ min}$. При этом принимают, что если $t_ш > t_{ш\ min}$, то $I_ш < 0{,}05\ I_{св}$, и шунтирование практически не влияет на электрическое поле и размеры ядра. Обычно значение $t_{ш\ min}$ задают не менее $3d_э$. В таблице 2.2 приведены значения $t_{ш\ min}$.

Токи шунтирования обычно снижаются в процессе сварки за счет нагрева шунта и снижения $r_{ээ}$. Также при шовной сварке герметичных соединений из-за повышенной температуры предыдущей точки токи шунтирования весьма ограничены, особенно при большой скорости и непрерывном вращении роликов.

Диаметр контактной поверхности электрода также оказывает значительное влияние на размеры и прочность сварной точка. С увеличением диаметра контактной поверхности электрода (остальные параметры процесса остаются без изменения) прочность сварной точки вначале медленно, а затем быстро снижается (рис. 2.9) [1, 8, 10, 12].

Это объясняется уменьшением плотности тока. Кривая 1 соответствует режиму сварки, близкому к точке С на рис. 2.7 – в этом случае прочность точки относительно мало чувствительна к изменению диаметра контактной поверхности электрода. Кривая 2 соответствует сварке с расплавлением ядра по режиму, близкому к точке В, при этом чем ближе режим к точке В (рис. 2.7), тем более резко сказывается изменение диаметра контактной поверхности электрода на прочности точки.

Таблица 2.2

Рекомендуемые значения $t_{ш\ min}$

Толщина одной детали, мм	Рекомендуемый минимальный шаг точек, мм	
	при сварке двух деталей	при сварке трех деталей
1	12	20
2	18	30
3	26	40
4	36	50
6	50	80

Примечание. При сварке легких сплавов минимальный шаг увеличивается на 15%, а при сварке аустенитной стали и жаропрочных сплавов шаг может быть увеличен на 15%.

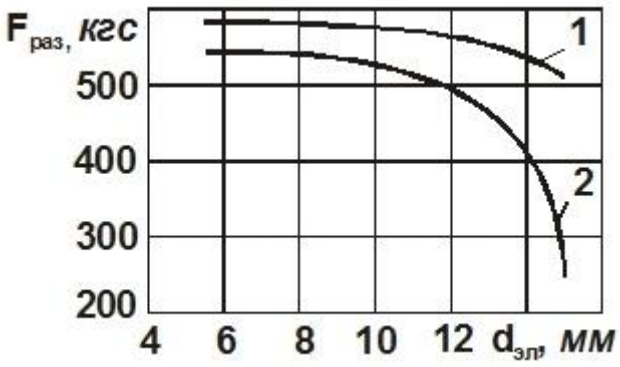


Рис. 2.9. Зависимость прочности точки от диаметра контактной поверхности электрода (сварка низкоуглеродистой стали толщиной 1 мм)

При сварке стали рабочая часть электрода обычно выполняется в виде усеченного конуса с плоским контактом, реже в виде цилиндра со сферической контактной поверхностью. При плоском контакте его диаметр рекомендуется выбирать по формулам:

$$d_э = 2s + 3 \text{ мм}, \text{ при } s < 2 \text{ мм};$$

$$d_э = 1{,}5s + 5 \text{ мм}, \text{ при } s > 2 \text{ мм}.$$

Сферическая контактная поверхность электродов при сварке стали обычно имеет радиус 50...100 мм.

Исходные размеры контактной поверхности электрода, устанавливаемые технологическим процессом, не остаются при сварке постоянными; вследствие систематического износа эти размеры постепенно увеличиваются. При нормальной эксплуатации увеличение диаметра контактной поверхности электрода в результате его износа не должно превышать 15–20 %.

Усилие сжатия электродов один из важнейших параметров сварки. Оно регулирует интенсивность нагрева в зоне сварки и определяет степень ее пластической деформации. С увеличением усилия сжатия уменьшаются контактные и собственное сопротивление деталей и снижается плотность тока в них. Поэтому, при постоянстве остальных параметров процесса, увеличение усилия сжатия замедляет нагрев и приводит к уменьшению размеров и прочности точки (рис. 2.4, *а*).

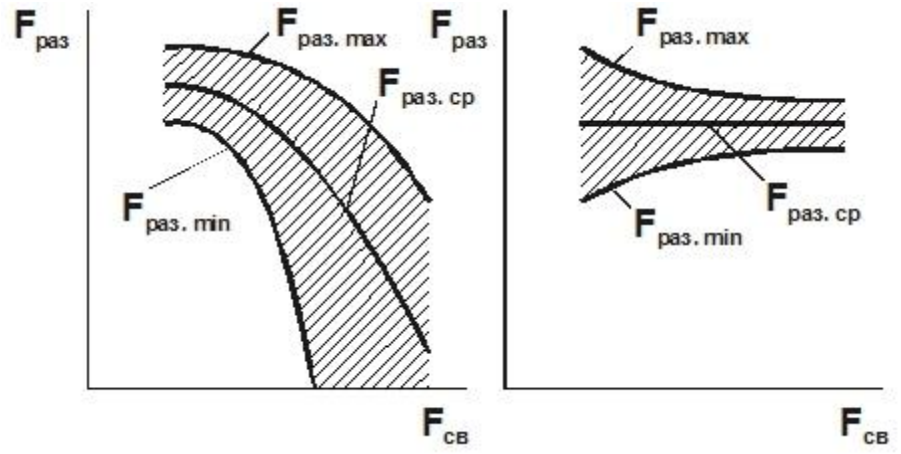


Рис. 2.10. Зависимость разрушающего усилия при испытании на срез от усилия сжатия электрода:
а – при изменении только усилия сжатия электродов; *б* – изменение усилия сжатия электродов сопровождается изменением сварочного тока или времени его протекания

Одновременно с уменьшением средней прочности точки увеличивается степень разброса результатов – понижается стабильность прочности. Последнее объясняется тем, что при значительном росте усилия сжатия электродов и при постоянстве остальных параметров размеры литого ядра точки резко уменьшаются или литое ядро не образуется [6, 8, 10, 12].

Если увеличение усилия сжатия сопровождается увеличением времени включения тока или повышением сварочного тока

(чтобы средняя прочность сварной точки оставалась при этом неизменной), то с увеличением усилия сжатия электродов прочность точек становится более стабильной (рис. 2.10, *б*).

Усилие сжатия электродов зависит от толщины свариваемых деталей и от длительности нагрева. Ориентировочно при сварке горячекатаной низкоуглеродистой стали оно может быть определено по формуле:

на «жестких» режимах – $F_{св}$=(100…200)s, H;

на «мягких» режимах – $F_{св}$=(60…100)s , H (2.8)

При свайке холоднокатаной стали усилие повышается на 20–30%.

Усилие сжатия электродов может быть определено по величине удельного давления p:

$$F_{св} = \frac{p\pi d_э^2}{4}. \qquad (2.9)$$

При сварке горячекатаной низкоуглеродистой стали на жестком режиме p = 50–120 МПа, на мягком – 30–60 МПа.

2.2.3. Режим стыковой сварки сопротивлением

При стыковой сварке сопротивлением для образования качественного соединения основное внимание уделяют получению равномерного нагрева торцов деталей и деформации металла, в наибольшей степени обеспечивающей разрушение и удаление оксидов [14].

Основными параметрами режима являются: сварочный ток $I_{св}$ или плотность тока j, время протекания тока $t_{св}$, начальное усилие сжатия $F_н$ и усилие осадки $F_{ос}$ (соответственно начальное давление $p_н$ и давление осадки $p_{ос}$), укорочение деталей при сварке $\Delta_{св}$, установочная длина l_0.

Выбор параметров начинают с определения правильного соотношения между j и $t_{св}$ используя эмпирическую зависимость:

$$j\sqrt{t_{св}} = k \cdot 10^3, \qquad (2.10)$$

где k – коэффициент, равный 8–10 для сталей, 20 для алюминия, 27 для меди.

Как j, так и $t_{св}$ колеблются в широких приделах. При чрезмерных плотностях тока возможен выплеск и малая зона нагрева. Уменьшение длительности нагрева приводит к неравномерности нагрева деталей на торцах, а увеличение усиливает окислительные процессы. В таблице 2.3 приведены определенные соотношения между максимальным током и минимальной длительностью.

Таблица 2.3

Плотность тока j и длительность его протекания $t_{св}$ при сварке сопротивлением стержней из углеродистой стали сечением F

F, мм	j, А/мм^2	$t_{св}$, мм	F, мм	j, А/мм^2	$t_{св}$, мм
25	200	0,6	250	90	1,5
50	160	0,8	500	60	2,5
100	140	1,0	1000	40	4,5

Наиболее часто нагрев при стыковой сварке сопротивлением контролируется укорочением заготовок, реже длительностью. Сварочный ток в первом случае отключается после укорочения заготовок на определенную величину, причем, если заданное укорочение велико, то может произойти перегрев и даже расплавление металла с появлением большого количества высаженного металла. При малом укорочении в стыке останутся непроваренные участки с окислами. Оптимальная величина укорочения увеличивается с увеличением площади свариваемого сечения и наличием на ней загрязнений. Она составляет для малоуглеродистых сталей при сечении 25–100 мм^2 0,8–1 мм, при сечении 250 мм^2 1,5–1,8 мм и при сечении 500÷1000 мм^2 2–2,5 мм. При сварке закаливающихся сталей эти значения увеличиваются на 15–25%. Величина осадки без тока примерно такая же. Осадочное давление изменяется от 10 до 50 МПа. Для малоуглеродистой стали рекомендуется 10–20 МПа. Если нагрев производится при одном давлении, а осадка – при другом, то давление при сварке некоторых легированных сталей в защитной среде может достигать 10–

15 МПа и более, т. е. оно будет таким же, как при сварке оплавлением. В этом случае при широкой зоне нагрева необходимое удельное давление можно определить приближенно по формуле:

$$p = (1 + 0,25\alpha \frac{F}{2\Delta_н S})\sigma_m, \qquad (2.11)$$

где F – площадь сечения; S – периметр; $\Delta_н$ – ширина зоны нагрева одной детали выше 900°; σ_m – придел текучести при температуре, средней между температурой сварки и 900° С; α – коэффициент объемно-напряженного состояния, для круглого сечения равен 1,3; для квадрата – 2; для прямоугольника – 2,3; для сечения сложной формы – 2,5.

Малое давление облегчает нагрев металла, однако его чрезмерное уменьшение вызывает перегрев, выплески, пористость в околостыковой зоне и не обеспечивает закрытия стыка без окислов. При очень большом давлении не достигается сварочная температура в стыке и растет количество высаженного металла [14].

Установочная длина l_0 (табл. 2.4), определяющая ширину зоны нагретого металла и устойчивость свариваемых концов, принимается минимально возможной, исключающей заметный теплоотвод в электроды и интенсивное охлаждение стыка. Она обычно бывает не менее половины диаметра заготовки. В таблице 2.4 приведены значения l_0 для компактных сечений. Эти значения в целях уменьшения потерь тепла в электроды часто при сварке малоуглеродистой стали увеличивают на 20–40 %, а при сварке легированных закаливающихся сталей – на 10 %. При сварке разнородных сталей более теплопроводный металл свариваемся с большей установочной длиной. Правильность выбора установочной длины в этом случае оценивается равномерным нагревом с обеих сторон от стыка.

Таблица 2.4

Минимальная установочная длина при сварке сопротивлением (для компактных сечений)

Сечение, мм^2	25	50	100	250	500	1000
Установочная длина, мм	3+3	4+4	5+5	6+6	9+9	12+12

2.2.4. Режим стыковой сварки оплавлением

Параметры режима стыковой сварки оплавлением зависят от теплопроводности и температуры плавления металла и определяются в основном скоростью оплавления, которая задается также с учетом активности металла к взаимодействию с газами и к процессам испарения легирующих элементов, а также от сечения свариваемых деталей. Усилие осадки и скорость осадки соответственно определяются теплопроводность металла и его активностью к окислению [14].

При сварке оплавлением стремятся обеспечить:

1) нагрев деталей для оплавления торцов и проведения деформации с целью удаления оксидов, а также для предупреждения образования неблагоприятных структур в околошовной зоне;

2) локальную интенсивность оплавления перед осадкой для формирования равномерно оплавленного слоя металла, предупреждения окисления и получения благоприятного рельефа поверхности торцов;

3) деформацию деталей с достаточно большой скоростью, предупреждающей преждевременное остывание металла торцов и застревание оксидов в стыке. Величина деформации должна обеспечивать определенное растекание металла в плоскости стыка и выравнивание рельефа поверхности, необходимое для выдавливания расплавленного металла и оксидов.

Основные параметры режима: скорость оплавления $\upsilon_{опл}$, плотность тока при оплавлении $j_{опл}$, припуск на оплавление $\Delta_{опл}$, время оплавления $t_{опл}$, величина осадки $\Delta_{ос}$ и ее скорость $\upsilon_{ос}$, длительность осадки под током $t_{ос.т}$ величина осадки под током $\Delta_{ос.т.}$, усилие осадки $F_{ос}$ или давление осадки $p_{ос}$, установочная длина детали l_0. Задают также напряжение холостого хода машины U_{20} и программу его изменения. При сварке импульсным оплавлением указывают также частоту $f_к$ и амплитуду колебаний $A_к$ подвижной плиты машины. При сварке оплавлением с подогревом задают температуру подогрева $T_{под}$, длительность подогрева $t_{под}$, число импульсов подогрева и их длительность $t_{имп}$, припуск на подогрев $\Delta_{под}$.

Скорость оплавления $\upsilon_{опл}$ выбирают из условий получения определенного распределения температур в деталях. Она зависит от плотности тока (вторичного напряжения), степени подогрева и марки стали. При сварке непрерывным оплавлением она постепенно возрастает от 0 до 6–8 мм/с. Средняя скорость для заготовок из малоуглеродистой стали составляет 0,5–1,5 мм/с, а заготовок из легированной стали 2,5–3,5 мм/с. При сварке с подогревом она зависит от интенсивности нагрева или его длительности (рис. 2.11). Средняя скорость в этом случае для малоуглеродистой стали составляет 1,5–2,5 мм/с, а для легированной 3,5–4,5 мм/с. Длительность непрерывного оплавления составляет около 1 с на 30 мм^2 свариваемого компактного, или 3–4 с на 1 мм толщины развернутого сечения (листы, трубы) [14].

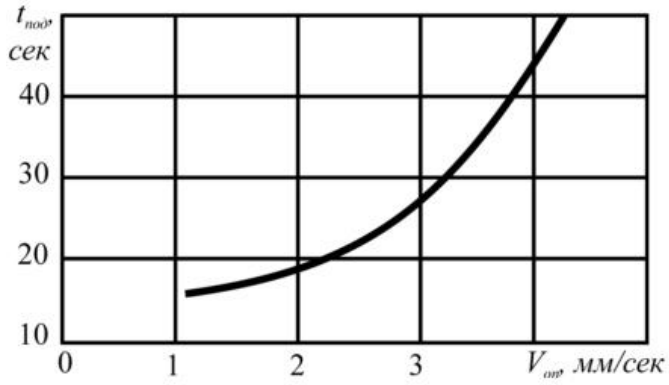


Рис. 2.11. Зависимость скорости оплавления от времени подогрева деталей

Как уже отмечалось, при оплавлении на одну и ту же величину ($\Delta_{опл}$) увеличение средней скорости $\nu_{опл.ср} = \Delta_{опл} / t_{опл}$ приводит к сужению зоны нагрева деталей и увеличению градиента температур dT/dx (рис. 2.12, *а*), уменьшению времени существования перемычек и более равномерному нагреву торцов деталей вследствие их более интенсивного оплавления. В тоже время размеры перемычек и кратеров увеличиваются (рельеф поверхности торцов ухудшается). При снижении скорость увеличивается длительность существования перемычек и глубина прогрева деталей, а градиент температур снижается. Размеры перемычек снижаются, а рельеф поверхности улучшается. Однако нагрев торцов становится менее равномерным. Для конкретных условий сварки существует некоторая оптимальная средняя скорость оп-

лавления, которая обеспечивает наилучшие показатели качества соединений (рис. 2.12, *б*).

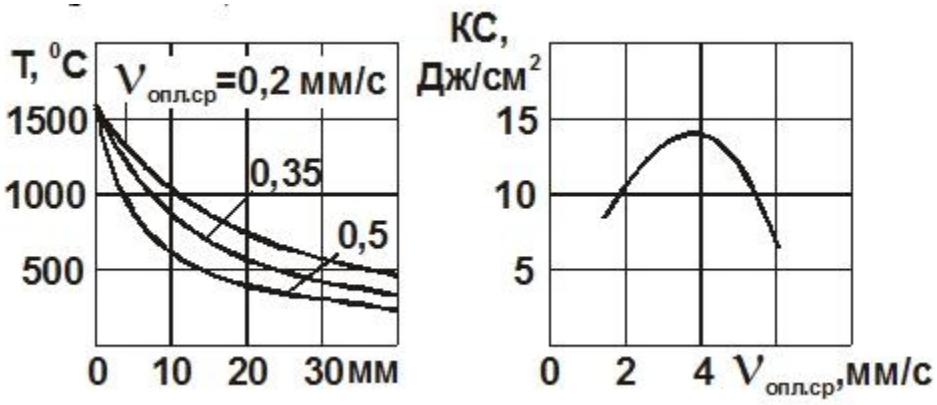


Рис. 2.12. Графики зависимости от средней скорости оплавления (сталь 12Х18Н9Т):
а – температурного поля вдоль оплавляемой детали; *б* – ударной вязкости сварного соединения

Припуск на оплавление $\Delta_{оп}$ обеспечивает равномерный нагрев по сечению, оптимальное распределение температуры вдоль деталей, образование слоя расплавленного метала на торцах. Обычно $\Delta_{оп}$ составляет 0,7–0,8 общего припуска на сварку. При сварке с подогревом и импульсным оплавлением $\Delta_{оп}$ сокращается в 2–3 раза. Припуск $\Delta_{оп}$ для сварки непрерывным оплавлением и для оплавлением с подогревом заготовок с компактными сечениями и с развернутыми (листы) можно выбрать по рис. 2.13, *а* и *б*.

Плотность тока $j_{опл}$, обеспечивает процесс устойчивого оплавления. Она увеличивается с увеличением теплопроводности металла и $\upsilon_{опл}$, снижается при сварке с подогревом, а так же при сварке деталей большого сечения. Вначале оплавления $j_{опл}$ наибольшая, по мере нагрева деталей она снижается, однако увеличение скорости оплавления к концу процесса вызывает увеличение $j_{опл}$ и для изделий сечением 250÷1000 мм^2 из сталей составляет 20–30 А/мм^2, а при сварке крупных изделий 5 А/мм^2. При сварке с подогревом плотность тока не превышает 20 А/мм^2. Необходимый при оплавлении ток в зависимости от сечения деталей различной длительности процесса можно определить по графику на рис. 2.14. Пунктирная кривая дает оптимальное соотношение между этими величинами. При токе, меньшем, чем указано кри-

вой, возможно закорачивание заготовок с прекращением оплавления, при большем возможен недостаточный нагрев.

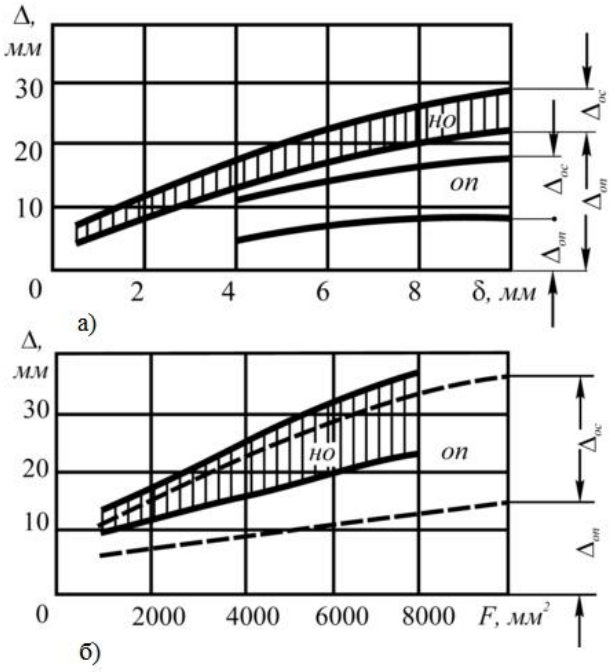


Рис. 2.13. Значение припуска на оплавление для заготовок:
а – с компактными сечениями и *б* – с развернутыми (листы)

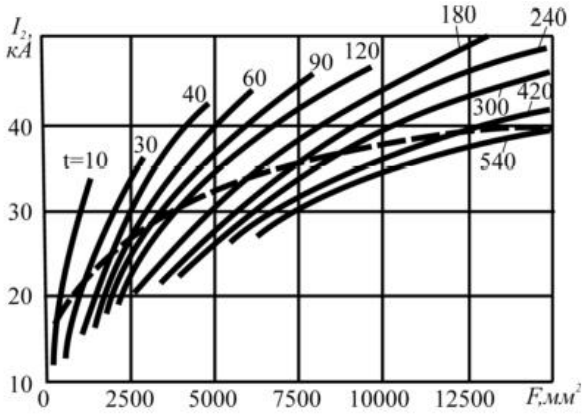


Рис. 2.14. Значение сварочного тока для деталей различного сечения при различной длительности процесса оплавления

Припуск на осадку $\Delta_{ос}$ выбирают из условия удаления нагретого металла и оксидов из стыка. Обычно он составляет 0,3–0,2 от общего припуска. Так же как и $\Delta_{оп}$, $\Delta_{ос}$ можно определить по графикам на рис. 2.13. Припуск на осадку под током $\Delta_{ос.\,т}$ связан со скоростью осадки $v_{ос}$ и обычно составляет 0,5–0,8 $\Delta_{ос}$.

Кратковременные процессы оплавления, а также процессы, построенные на использовании больших мощностей, всегда требуют соответствующего увеличения $\Delta_{оп}$. С увеличением $\Delta_{оп}$ и получением равномерно нагретых торцов, покрытых ровным слоем расплавленного металла, $\Delta_{ос}$ при достаточной $v_{ос}$ может существенно сокращаться. Применение защитных сред также позволяет существенно сократить $\Delta_{оп}$ и $\Delta_{ос}$.

Удельное давление осадки $p_{ос}$ зависит от природы свариваемого металла и степени нагрева деталей. Непосредственно с удельным давлением связан $\Delta_{ос}$, который увеличивается с ростом площади свариваемого сечения и ширины зоны разогрева; $\Delta_{ос}$, зависит также от пути, по которому должны быть удалены загрязнения торцов, и от интенсивности окисления металла при оплавлении. Величина осадки и удельное давление определяются шириной зоны нагрева, прочностью металла при температуре сварки и схемой объемно-напряженного состояния. Его конкретные значения указываются при сварке каждого изделия.

Скорость осадки $v_{ос}$ существенно влияет на степень очистки стыка от окисных включений и пластичность соединений. Она не должна быть менее 10 мм/с, при сварке высокоуглеродистой стали и чугуна, 15–30 мм/с – малоуглеродистой стали, 30–50 мм/с – сложнолегированных сталей и 200 мм/с у алюминия, меди, алюминиевых и других сплавов с легкоокисляющимися элементами [14].

Усилие зажатия $F_{заж}$ выбирают из условия предупреждения проскальзывания деталей в губках при осадке: $F_{заж} = k_0 F_{ос}$, коэффициент k_0 обычно колеблется от 1,5 до 4 и зависит от свойств свариваемого металла, конструкции зажимов, наличия упоров, конфигурации деталей.

Напряжение холостого хода U_{20} выбирают минимальным, обеспечивающим устойчивое оплавление (рис. 2.15).

Установочная длина деталей $2l_0 = \Delta_{оп} + \Delta_{ос} + \Delta_к$, где $\Delta_к$ – конечное расстояние между зажимами. Обычно при сварке стальных круглых стержней и толстостенных труб $l_0 = (0{,}7 \div 1{,}0)d$, где d – диаметр свариваемых деталей, для медных $2d$; для полос $l_0 = (4 \div 5)s$, где s – толщина полосы.

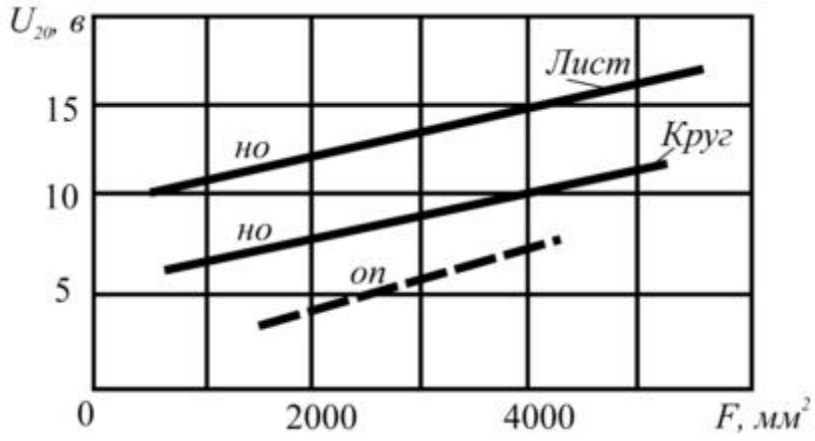


Рис. 2.15. Значение напряжения холостого хода U_{20} для сварки деталей различного сечения

В зависимости и сечения свариваемых деталей, величину $2l_0$ можно определить по графику на рис. 2.16. При малой l_0 наблюдается большой отвод теплоты в электроды, а зона интенсивного нагрева сужается, что требует увеличения $p_{ос}$. С увеличением l_0 увеличивается требуемая электрическая мощность и уменьшается жесткость деталей.

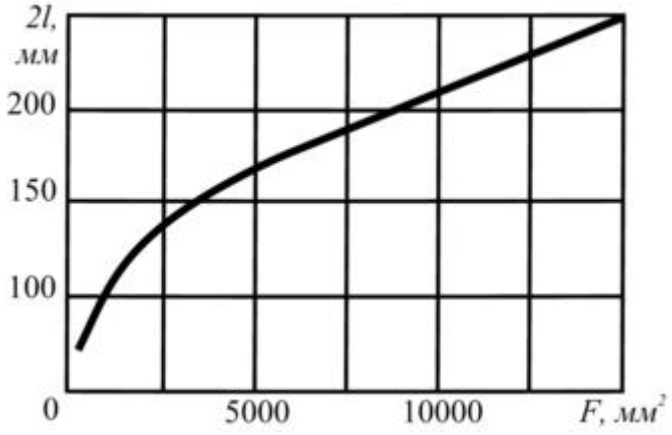


Рис. 2.16. Графическая зависимость установочной длины свариваемых деталей различного сечения

При сварке оплавлением с подогревом температуру подогрева $T_{под}$ выбирают в зависимости от сечения свариваемых деталей и их металла. При сварке конструкционных сталей температура. подогрева обычно составляет 800÷1000 °С и возрастает до 1000÷1200 °С при сварке деталей сечением 10000÷20000 мм^2. Температура подогрева деталей из труднодеформируемых аусте-

нитных сталей на 100÷150 °С выше. Время подогрева $t_{под}$ возрастает с увеличением площади сечения деталей от нескольких секунд при сварке деталей сечением 500÷1000 мм^2 до нескольких минут при, сварке деталей сечением 15000÷20000 мм^2. Длительность импульсов подогрева $t_{им}$ обычно составляет 1÷8 с, а припуск на подогрев $\Delta_{под}$ изменяется в пределах 1÷12 мм в зависимости от сечения деталей и свойств свариваемого металла.

После анализа образования соединений, особенностей стыковой сварки свариваемого материала и формы деталей, а также возможностей сварочного оборудования выбирают ориентировочные значения параметров режима, которые затем корректируются при сварке образцов-свидетелей с учетом конкретных технологических условий сварки до получения требуемого качества соединения. Уточненный (оптимальный) режим, обеспечивающий положительные результаты сварки, фиксируется в соответствующей технологической документации; при этом выдается разрешение на сварку изделий.

Ориентировочные режимы сварки можно также определить расчетом с использованием критериев подобия, если известны режимы сварки деталей из того же металла, близких по геометрической форме, но различных по размерам. Согласно теории подобия температурных полей и деформаций, при геометрическом подобии параметры режима соединений определяются четырьмя критериями:

$$П_1 = \frac{at_{св}}{l^2};\ П_2 = \frac{v_{опл} l}{a};\ П_3 = \frac{U_{ээ}^2}{\rho\lambda T};\ П_4 = \frac{F_{ос}}{l^2\gamma_m} = \frac{p_{ос}}{\gamma_m},$$

где l – линейный размер (диаметр стержня при стыковой сварке); $U_{ээ}$ – напряжение на свариваемых деталях; $F_{ос}$ и $p_{ос}$ – соответственно усилие сжатия свариваемых деталей и давление сжатия.

Теплофизические характеристики металла ρ, λ, а принимают постоянными, не зависящими от температуры.

Из приведенных критериев подобия вытекают следующие зависимости параметров режима сварки от линейного размера детали l:

1. длительность сварки пропорциональна второй степени линейного размера, т.е. $t_{св} \equiv l^2$ (из критерия $П_1$);

2. скорость оплавления $v_{опл} \equiv 1/l$ (из критерия $П_2$);
3. напряжение $U_{ээ}$ не зависит от размера l (из критерия $П_3$);
4. сварочный ток $I_{св} = l$, так как $U_{зз} = I_{св}\,\gamma_{зз}$, а $\gamma_{зз} \equiv 1/l$;
5. из соотношения $j = I_{св}/l^2$ следует, что плотность тока $j \equiv 1/l$;
6. усилие сжатия $F_{ос} \equiv l^2$ (из критерия $П_4$).

2.2.5. Программирование режимов контактной сварки

Современные контактные машины позволяют в широких пределах регулировать процессы нагрева и деформирования металла, иначе говоря, программировать термомеханический режим сварки. Программирование режима заключается в правильном выборе формы кривой сварочного тока и изменение сварочного усилия за цикл сварки. Это дает возможность эффективно управлять качеством соединений и обеспечивать условия для предупреждения дефектов.

В условиях точечной и шовной сварки наиболее рациональная циклограмма изменения усилия и тока приведена на рис. 2.17. Циклограмма усилия имеет три части I, II, III – примерные границы стадий формирования соединения.

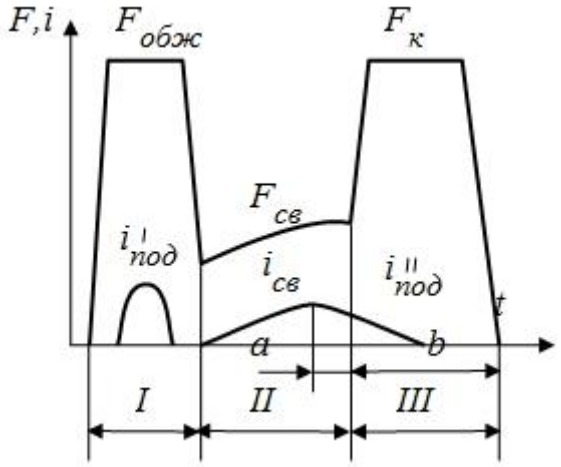


Рис. 2.17. Рациональная циклограмма точечной сварки

На I стадии предварительное обжатие $F_{обж}$ служит для устранения зазоров между деталями, получения требуемого значения $r_{ээ}$ в холодном состоянии, предупреждения наружных и внутренних выплесков, вытеснения пластичных прослоек грунта, клея. Монотонное нарастание $F_{св}$ на II стадии позволяет поддер-

живать постоянство давления между деталями несмотря на рост площади контактов и диаметра жидкого ядра. На III стадии можно выделить два участка *a* и *b*: на небольшом первом участке $F_{св}$ постоянно (обычно в течение 0,02–0,1 с) для некоторого охлаждения наружных слоев металла деталей и предупреждения глубоких вмятин при проковке; на втором – прикладывают и поддерживают длительно ковочное усилие $F_к$ для снижения растягивающих напряжений, уменьшения коробления узлов, предупреждения горячих трещин и раковин [6, 9, 10].

Циклограмма тока также имеет три части в соответствии со стадиями процесса: ток подогрева $i'_{под}$, возрастающий ток сварки $i_{св}$ и спадающий ток подогрева $i''_{под}$ для замедления охлаждения. Скорость нарастания и спада токов, а также их длительность должны быть определенными, так как они обуславливают скорость нагрева и охлаждения металла.

Однако на практике в зависимости от толщины, свойств, конфигурации и ответственности узлов, качества сборки, а также реальных возможностей сварочного оборудования циклограмму усиления упрощают. В частности, пока нет оборудования для плавного изменения усилия сжатия. Его изменяют ступенчато. При точечной сварке чаще используют циклограмму с постоянным усилием (рис. 2.18, *а*). Для толстых деталей и металлов, склонных к горячим трещинам, – циклограмму *б* с ковочным усилием. Для устранения зазоров и предупреждения выплесков, а также при сварке деталей с предварительно нанесенным жидким покрытием (клеем, лаком, грунтом) применяют циклограмму *в*. Циклограмму *г*, в значительной степени соответствующую циклограмме на рисунке 2.18, используют при сварке деталей толщиной свыше 4 мм.

Программу нагрева зоны сварки в большинстве случаев задают в виде одного импульса сварочного тока, как это показано на рис. 2.18, *а–г*. Регулируя соответственно длительность сварочного импульса и его величину, получают жесткий или мягкий режим.

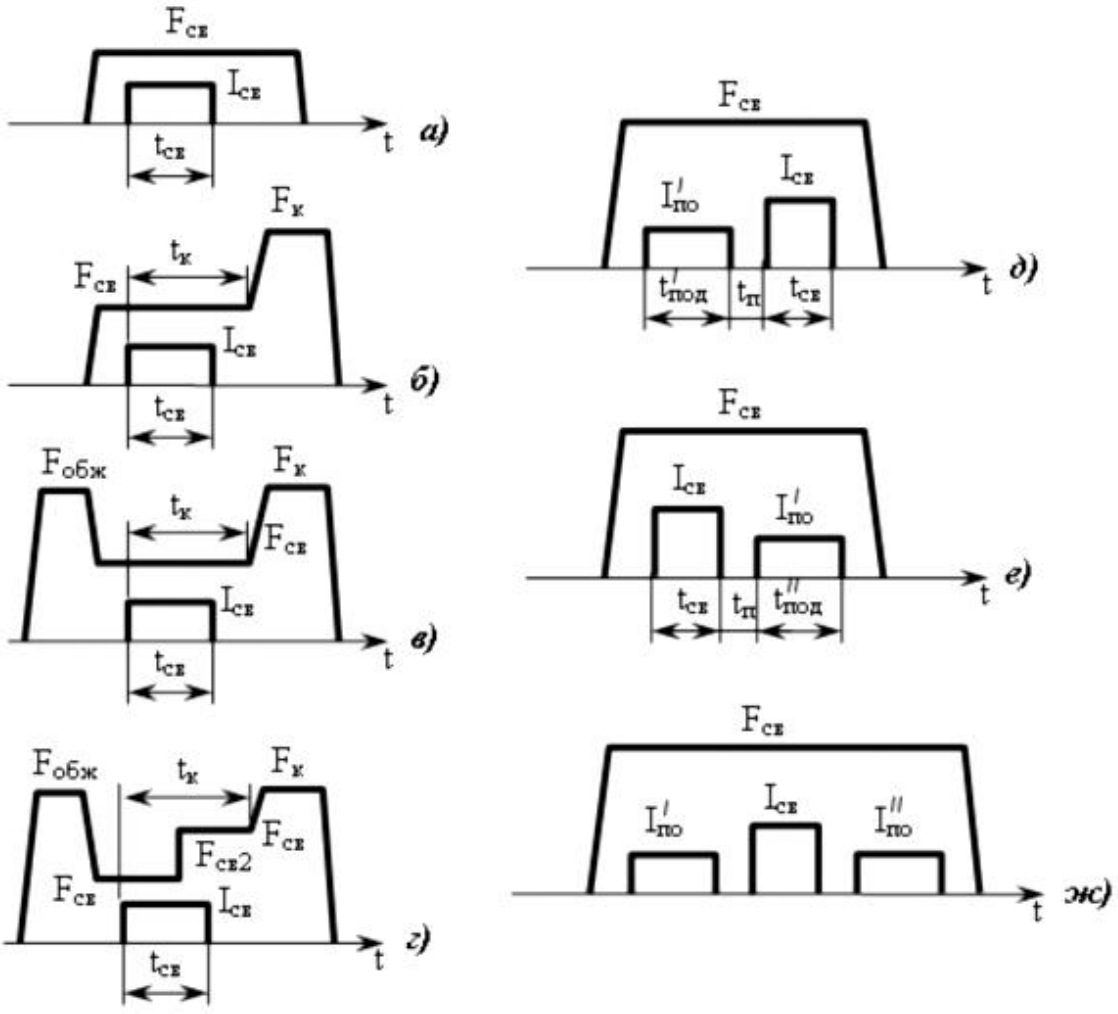


Рис. 2.18. Циклограммы усиления и тока при точечной сварке: *а* – с постоянным сварочным усилением $F_{св}$; *б* – то же и приложением ковочного усилия $F_к$; *в* – с предварительным обжатием и проковкой; *г* – со ступенчатым увеличением сварочного усилия (от $F_{св1}$ до $F_{св2}$) и проковкой $F_к$; *д* – с предварительным подогревом; *е* – с последующим подогревом; *ж* – трехимпульсная программа с предварительным и последующим подогревом

В некоторых случаях для устранения сборочных зазоров и предупреждения внутренних выплесков используют предварительный подогрев зоны сварки дополнительным подогревным импульсом тока (циклограмма тока *д*). Циклограмма усилия при этом может быть различной (рис. 2.18, *а–г*). Частично для этих же целей снижают скорость нагрева за счет модулирования переднего фронта сварочного тока длительностью $t_н$ (рис. 2.18, *б*).

Для уменьшения склонности к горячим трещинам, выполнения термообработки или с целью снижения величины $F_к$ при-

меняют последующий подогревный импульс тока (циклограмма тока на рис.2.18, *е*) в сочетании с любой циклограммой усилия. Скорость охлаждения уменьшается также путем замедленного спада заднего фронта импульса сварочного тока за время $t_{сп}$ (рис.2.18, *б–г*) [6, 9, 10, 12].

Иногда, в особо трудных случаях, используют два дополнительных импульса тока (циклограмма тока ж на рис. 2.18), а также модулируют сразу и передний, и задний фронт импульса сварочного тока (рис. 2.19, *б*).

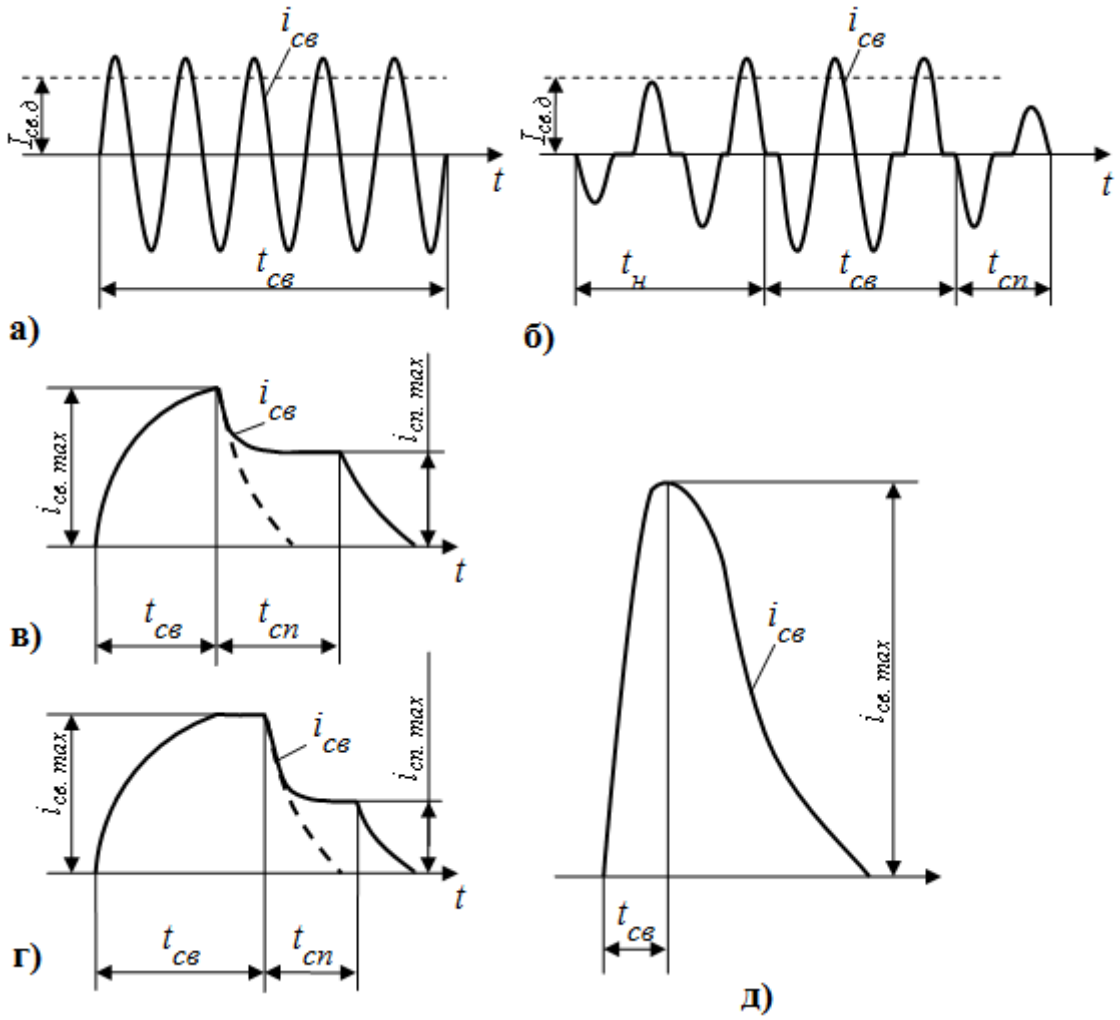


Рис. 2.19. Формы импульса сварочного тока в машинах различного типа: *а* – переменного тока; *б* – переменного тока с модуляцией; *в* – низкочастотных; *г* – с выпрямлением тока во вторичном контуре; *д* – конденсаторных

При шовной сварке герметичным швом для формирования каждой литой зоны обычно достаточно одного импульса тока при постоянном сварочном усилии. Сварку можно осуществлять при

непрерывном и прерывистом включении тока. Непрерывное включение тока (циклограмма *а* на рис. 2.20) позволяет резко повысить скорость сварки. Однако качество соединений и стойкость роликов снижаются. Наибольшее распространение получила сварка с включением тока отдельными импульсами за время $t_п$ ролики и детали успевают частично охладиться, поэтому стойкость роликов возрастает, уменьшается ширина ЗТВ, снижаются остаточные деформации [6, 9, 10, 12].

Сварку чаще выполняют при непрерывном вращении роликов (циклограмма *б* на рис. 2.20). Крупногабаритные детали большой толщины соединяют при шаговом вращении роликов (циклограмма *в* на рис. 2.20). Остановка роликов в момент пропускания тока способствует интенсивному охлаждению деталей и рабочей поверхности роликов. Стабилизируются контакты, устраняется проскальзывание роликов, снижается температура в контакте электрод – деталь, уменьшается химическое взаимодействие металлов электрода и детали. Стойкость электродов возрастает. Кроме того, остановка роликов позволяет приложить силу $F_к$.

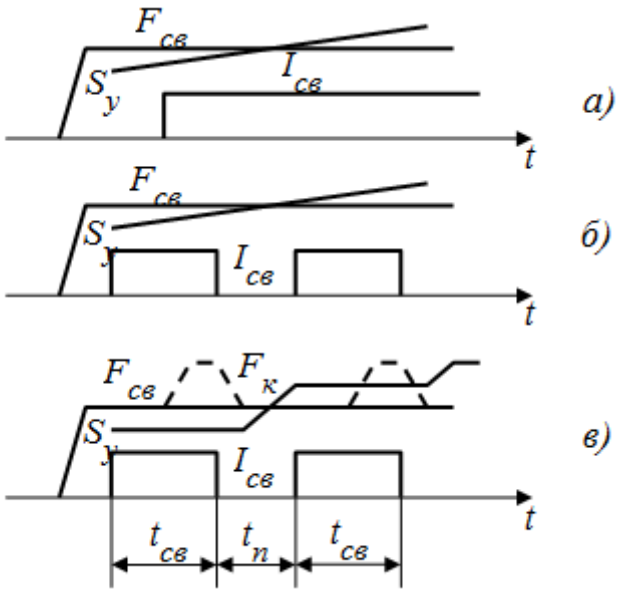


Рис. 2.20. Циклограмма шовной сварки:
а – с непрерывным включением тока, непрерывным вращением роликов, постоянным $F_{св}$; *б* – с прерывистым включением тока, непрерывным вращением роликов, постоянным $F_{св}$; *в* – с прерывистым включением тока, прерывистым (шаговым) вращением роликов, постоянным $F_{св}$ или с проковкой шва $F_к$

2.3. Особенности контактной сварки различных сталей и сплавов

В результате комплексного анализа свойств и свариваемости сплавы условно разбиты на восемь групп [2].

2.3.1. Низко и среднеуглеродистые, низколегированные стали

Низкоуглеродистые стали (группа 1). Стали с содержанием до 0,25 % С бывают обыкновенные и качественные. Последние имеют более узкие пределы содержания углерода и примесей в каждой марке. В зависимости от полноты раскисления они могут быть спокойными (сп), кипящими (кп) и полуспокойными (пс).

Средние значения удельного электросопротивления (ρ ~ 13*мкОм·см*), малое сопротивление деформации σ^*_{∂} (~ 200 МПа), низкая чувствительность к термическому циклу и выплескам позволяют сваривать эти стали как на жестких, так и на мягких режимах при небольшом сварочном токе $I_{св}$ и малом сварочном усилии $F_{св}$ электродами с плоской рабочей поверхностью, электропроводимостью не менее 80 % электропроводимости меди и твердостью НВ 120–140. Обычно применяют один импульс тока с постоянным усилием – циклограмму *а,* при толщине более 2 мм циклограмму *б* (рис. 2.18). Однако ковочное усилие ускоряет охлаждение металла и при сварке сталей с содержанием более 0,2% С может вызвать образование мартенсита закалки, понизить пластичность соединений. Шовную сварку выполняют, используя циклограмму *б* (рис. 2.20) [10, 12].

Отсутствие элементов, образующих тугоплавкие оксиды, позволяет получить качественное соединения при стыковой сварке. Для этих сталей характерны следующие параметры режима сварки оплавлением: плотность тока при непрерывным оплавлении $j_{опл}$ = 8–30 А/мм^2; $\upsilon_{опл.\ сп}$ = 0,8–1,5 мм/с, конечная скорость оплавления перед осадкой $\upsilon_{опл.\ к}$ = 4–5 мм/с; $\upsilon_{ос}$ = 30 мм/с; $\rho_{ос}$ = 60–80 МПа. Удельная мощность при сварке непрерывным оплавлением составляет 0,2–0,3 кВА/мм^2, а при сварке с подогревом 0,1–0,2 кВА/мм^2. Режим сварки сопротивлением может быть мяг-

ким: $j_{опл}$ = 60–20 А/мм^2; $t_{св}$ = 0,5–10 с; $\rho_н$ = 15–30 МПа; $\rho_{ос}$ = 1,5–2$\rho_н$. Иногда применяют более жесткие режимы: $t_{св}$ = 0,6–1,5 с; j = 200–90 А/мм^2.

Среднеуглеродистые и низколегированные стали (группа 2). Это стали с содержанием 0,25-0,45% С и стали с суммарным содержанием легирующих элементов (Mn, Ni, Cr, Si, Ti, Zr, Nb, W, Mo) до 2,5%. С увеличением содержания углерода и легирующих элементов растет удельное электросопротивление, сопротивление деформации, расширяется ТИХ и возрастает склонность к кристаллизационным трещинам, усиливается склонность к закалке, сопровождающейся образованием мартенсита в ядре и околошовной зоне. Скорости охлаждения зоны сварки на мягком и жестком режимах оказываются выше критической $\upsilon_{кр}$. Аустенит непосредственно переходит в хрупкий и твердый мартенсит.

Такие свойства сталей требуют медленного нагрева – мягкого режима с длительностью сварочного тока в 4–5 раз большей, чем для сталей группы 1. Полезен также предварительный подогрев (циклограмма *д,* рис. 2.18) или плавное увеличение тока (рис.2.19, *б–г*), особенно при толщине деталей более 1,5 мм.

Для замедления охлаждения часто применяют циклограмму *е* (рис. 2.18). Ток подогрева $I''_{под}$ осуществляет отпуск закаленной точки. Зону сварки при этом нагревают до температуры, близкой к Ac_1. Параметры $I'_{под}$, $t''_{под}$, $t_п$ выбирают в зависимости от марки и толщины стали. Обычно $I'_{под}$ = (0,7–0,8)$I'_{св}$, $t''_{под}$ = (1,5–1,8)$t_{св}$, $t_п$ = (1,1–1,4)$t_{св}$.

По отношению к сварке металлов группы 1 $F_{св}$ увеличивают в 1,5–2 раза. Если при толщине более 2 мм в ядре возникают несплошности, применяют циклограмму *б* (рис. 2.12) и циклограмму *е* (рис. 2.18), либо плавно понижают сварочный ток. Как уже отмечалось, $F_к$ несколько повышает скорость охлаждения металла, поэтому при двух импульсах тока и проковке уменьшают $t_п$. Часто эти стали, сваривают тремя импульсами (циклограмма *ж*, рис. 2.18) Форму и материал электродов выбирают как для металлов группы 1. Шовную сварку выполняют на сравнительно мягких режимах с постоянным, но несколько увеличенным (для

подавления дефектов) усилием (циклограмма *б,* рис.2.20) роликами с цилиндрической формой рабочей поверхности.

При стыковой сварке этих сталей обычно применяют сварку оплавлением. Для предупреждения окисления легирующих элементов несколько увеличивают $\upsilon_{опл}$ (до 5–6 мм/с) и 4 (до 75–100 МПа). Пластичность соединения повышают подогревом деталей и замедленным охлаждением или быстрым охлаждением и последующим отпуском [9, 10].

Особенности сварки высокоуглеродиетых сталей связаны с большим интервалом их кристаллизации и склонностью к закалке. Большое содержание углерода приводит к интенсивному выделению при оплавлении окиси углерода, что резко уменьшает окисление оплавленной поверхности торцов и позволяет сваривать высокоуглеродистые стали при умеренных скоростях оплавления и осадки: $\upsilon_{опл}$ = 0,6–1,2 мм/с, $\upsilon_{ос}$ = 25 мм/с. Для предотвращения образования усадочных рыхлот в зоне частичного расплавления эти стали целесообразно сваривать при возможно меньшей глубине прогрева деталей и применять повышенное давление осадки (до 100–120 МПа). Пластичность соединений повышают замедленным охлаждением, отпуском после охлаждения деталей или изотермическим отпуском сразу после сварки.

2.3.2. Легированные стали и титановые сплавы

Легированные стали и сплавы (группа 3). Коррозионно-стойкие стали могут быть различного класса: аустенитные, ферритные, аустенитно-ферритные.

Стали аустенитного класса (12Х18Н10Т, 04Х18Н10, 08Х15Н24В4ТР и др.) отличаются весьма большой прочностью и одновременно пластичностью, имеют более высокую коррозионную стойкость, чем стали ферритного класса (08Х17Т, 12Х17). Минимальное количество углерода (< 0,12 %) предупреждает выделение карбидов хрома на границах зерен (при 500–800 °С) и сохраняет высокую сопротивляемость к межкристаллитной коррозии. Для этих же целей в сталь вводят сильные карбидообразователи – Ti, Nb (стабилизирующие сталь).

Аустенитные стали обладают сравнительно высоким ρ_o (~ 70 *мкОм·см*) и малым λ. Поэтому для них сварочный ток должен быть существенно меньше, чем для сталей группы 1.

Повышенное сопротивление деформации (~ 300 МПа) при $t_{св} \approx t_{св1}$ требует применять значительные сварочные усилия $F_{св} = 1{,}5F_{св1}$, где $t_{св1}$ и $F_{св1}$ –соответственно время и усилие для металлов группы 1. Форму рабочей поверхности электродов устанавливают как для металлов группы 1, однако сравнительно высокое ρ_o и малое λ позволяют снизить электропроводимость материалов электродов до 55–75 % электропроводимости меди с соответствующим увеличением твердости.

При точечной и шовной сварке соединения даже нестабилизированных аустенитных сталей не проявляют склонности к межкристаллитной коррозии, так как время пребывания металла выше критических температур не превышает 1 мин, и обеднение границ хромом не возникает. Малая склонность к горячим трещинам, формирование плотной столбчатой структуры литого ядра позволяют сваривать эти стали с постоянным усилием (циклограмма *а,* рис. 2.18). При толщине деталей более 2 мм применяют проковку (циклограмма *б,* рис. 2.18). Шовную сварку выполняют с непрерывным вращением роликов и импульсным включением тока (циклограмма *б,* рис. 2.20), формируя непрерывный прочноплотный шов с перекрытием точек на 30–60 %.

Аустенитные стали хорошо свариваются при условии интенсивного оплавления перед осадкой и большой скоростью осадки. Это связано с образованием на оплавленной поверхности тугоплавких окислов хрома. Конечная скорость оплавления должна быть не менее 5–6 мм/с, а скорость осадки не менее 50 мм/с. В связи с жаропрочностью этих металлов необходимое давление осадки в 2–3 раза выше, чем при сварке низкоуглеродистой стали [6, 9, 10, 12].

Особенность стыковой сварки высоколегированных перлитных сталей связана с их склонностью к закалке и высоким сопротивлением пластической деформации. В зависимости от рода и степени легирования давление осадки повышают на 50–100 % по сравнению с давлением осадки низкоуглеродистой стали. При сварке желательны повышенные скорости оплавления и осадки.

После сварки изделия из этих сталей обычно подвергаются местной или общей термообработке.

Жаропрочные стали и сплавы типа ХН75МБТЮ, ХН70Ю, ХН38ВТ (подгруппа «б») представляют собой дисперсионно твердеющие сплавы с интерметаллидным упрочнением. Небольшие количества бора, церия способствуют дополнительному повышению прочности границ зерен.

Эти сплавы и стали отличаются очень большим $\rho_о$ (~ 90 *мкОм·см*) и весьма малым λ. Поэтому требуемый сварочный ток $I_{св} = 0{,}7I_{св1}$. Высокое сопротивление деформации (~ 500 МПа) требует для предупреждения внутренних выплесков очень мягких режимов при $t_{св} = (2–3)\ t_{св1}$ и больших усилий $F_{св} = (2{,}5–3)F_{св1}$. Эти материалы обычно сваривают электродами с плоской рабочей поверхностью (с цилиндрической рабочей поверхностью роликов). Однако вследствие малого $\rho_о$ электропроводимость материала электродов и роликов может быть снижена до 45 %, а твердость из-за высокого $\sigma^*_д$ должна быть повышена до 160–240 МПа. Обычно используют циклограмму *а* (рис. 2.18), но для предупреждения усадочных раковин, снижения коробления и остаточных напряжений, особенно при толщине деталей более 1,5 мм, применяют циклограмму *б* и даже *в* (рис. 2.18). Шовную сварку ведут по циклограмме *б* (рис. 2.19).

Сплавы повышенной жаропрочности типа ХН70ВМТЮФ, ХН77ТЮР, ХН60ВТ, ХН56ВМТЮ и др. (подгруппа «в») отличаются сложным составом. Обычно они упрочняются методом дисперсионного твердения, некоторые из них имеют тугоплавкие фазы по границам зерен, слабо взаимодействующие с основой при нагреве.

Такое строение резко повышает $\rho_о$ (до 120–150 *мкОм·см*) и $\sigma^*_д$ (до (~ 700 МПа). Поэтому ток существенно уменьшают ($I_{св} = 0{,}6I_{св1}$), а во избежание выплесков применяют наиболее мягкие режимы: $t_{св} = (2{,}5–4)\ t_{св1}$ и предварительный подогрев (циклограмма тока *д,* рис. 2.18). Желательно плавное нарастание тока. Устанавливают максимальные усилия $F_{св} = (3–4)F_{св1}$ с циклограммой усилия как для подгруппы «б». Большие значения $\rho_о$ и высокая жаропрочность материалов этой подгруппы требуют

особо твердых электродных материалов (до 240 МПа) с низкой электропроводимостью.

Стыковую сварку выполняют при интенсивном оплавлении $\upsilon_{опл.\ к}$ = 8–10 мм/с и высокой скорости осадки $\upsilon_{ос}$ = 60–80 мм/с. Давление осадки $\rho_{ос}$ = 350–500 МПа. Плотность тока $j_{опл}$ = 8–12 А/мм^2. Для снижения 350 МПа иногда применяют предварительный подогрев деталей.

Титановые сплавы (группа 4). По структуре после нормализации эти сплавы делят на три группы: α (ВТ5, ВТ1-0), α+β (ВТ3-1, ВТ6С, ВТ14, ВТ22) и β-сплавы (ВТ15). Граница между ними не является абсолютной: имеются, например, сплавы псевдо-α, содержащие небольшое количество β-фазы (ОТ4, ОТ4-1, ОТ4-2, ВТ20 и др.). Полиморфное превращение β-титана в α-титан при быстром охлаждении сплава происходит в определенном интервале температур и сопровождается появлением метастабильных фаз, которые при последующем нагреве выше 400 °С распадаются и определяют конечные свойства сплава. Однако при точечной, шовной (и рельефной) сварке подобные изменения оказываются незначительными в силу скоротечности нагрева, охлаждения и мало влияют на механические характеристики соединений.

Сплавы титана имеют высокое удельное электросопротивление (~ 140–160 *мкОм·см*), поэтому для сварки требуется небольшой сварочный ток: $F_{св}$ = (2,5–3)$F_{св1}$. Сравнительно невысокое 350 МПа, малая склонность к горячим трещинам позволяют сваривать без выплесков при $t_{св} \approx t_{св1}$ и постоянном $F_{св} \approx F_{св1}$, используя цикл *а* (рис. 2.18). Однако для некоторых сплавов, чувствительных к термомеханическому циклу, приходится дополнительно программировать ток и усилие (модуляция, проковка). Это необходимо для снижения остаточных напряжений и уменьшения неблагоприятных изменений структуры и свойств металла. Для шовной сварки применяют циклограмму *б* (см. рис. 2.20). Титановые сплавы соединяют электродами с плоской или сферической рабочей поверхностью из материалов с пониженной электропроводимостью и повышенной твердостью (как для металлов группы 3). Вообще, по сравнению с металлами других групп титановые сплавы обладают наилучшей свариваемостью как на мягких, так и на жестких режимах, образуя соединения с развитой литой зоной [6, 9, 10, 12].

При стыковой сварке интенсивным непрерывным оплавлением без специальной защиты зоны сварки применяют следующий режим: $\upsilon_{опл.\ к}$ = 4–10мм/с; $\upsilon_{ос}$ = 200 мм/с; $p_{ос}$ = 30–100 МПа; $j_{оп\ л}$= 8–12 А/мм^2. При этом удельная мощность составляет около 0,1 кВА/мм^2. Некоторое уменьшение $p_{ос}$ объясняется локализацией деформации на участке деталей, нагретых свыше 1200–1300 °С. После сварки многие титановые сплавы подвергают термообработке. При сварке в аргоне формирование качественного соединения существенно облегчается.

2.3.3. Алюминиевые сплавы

А л ю м и н и е в ы е с п л а в ы (группа 5). Деформируемые сплавы, упрочняемые нагартовкой, типа АМц, АМг, АМгЗ (подгруппа «в») имеют сравнительно узкий интервал кристаллизации и умеренную склонность к горячим трещинам. В зоне теплового воздействия наблюдается рост зерна и разупрочнение, вызванные снятием нагартовки. Однако прочность и пластичность сохраняются равными в отожженном состоянии металла.

Сплавы этой подгруппы отличаются исключительно малым ρ_0 (~ 4–5 *мкОм·см*) и высоким λ. Поэтому их сваривают на жестких режимах ($t_{св}$ = 0,5$t_{св1}$) при большом сварочном токе $I_{св}$ = (3–5)$I_{св1}$. В связи с высокой активностью к массопереносу применение жестких режимов предпочтительно.

Небольшое σ^*_{∂} (80–90 МПа) требует применять $F_{св}$ <$F_{св1}$, однако из-за более жесткого режима его повышают примерно до $F_{св1}$. При толщине деталей до 2 мм точечную сварку проводят по циклограмме усилия *а;* при большей толщине - по циклограмме *б* (рис. 2.18). Шовную сварку ведут обычно при непрерывном вращении роликов (циклограмма *б,* рис. 2.20).

Деформируемые сплавы, упрочняемые термообработкой (Д16Т, Д19Т, Д20Т, 1420, 1395 и др.), а также сплав АМг6 (подгруппы «а» и «б») обладают широким интервалом кристаллизации (до 130 °С) и весьма склонны к горячим трещинам, этому способствует и дендритная ликвация с образованием толстых эвтектических прослоек в литом ядре. Механические свойства металла ядра приближаются к свойствам отожженного сплава.

При сварке сплавов, упрочняемых термообработкой, типа Д16Т, 1420 и др. в околошовной зоне происходит снижение прочности металла. Возникают участки с различной степенью распада твердого раствора и коагуляции упрочняющих фаз (рис. 1.26 первой части). Непосредственно около литой зоны имеются участки с оплавленными границами зерен, где происходит наибольшее снижение прочности и пластичности. Регулируя длительность импульса сварочного тока, можно менять протяженность этой зоны, однако прочность соединения в целом остается почти без изменений [6, 9, 10, 12].

Весьма малые значения ρ_0 (~ 6–13 *мкОм·см*) и высокий λ требуют жестких режимов при $t_{св}$ *как* для подгруппы «а». В связи с более высоким σ^*_{∂} (100–140 МПа), а также склонностью к внутренним выплескам и горячим трещинам сварочное усилие увеличивают до $(1{,}2–1{,}4)F_{св1}$. Увеличение $F_{св}$ вызывает необходимость некоторого повышения сварочного тока по сравнению с током для подгруппы «а» ($I_{св}=(3{,}5–4)I_{св1}$). Чем жестче режим, тем больше устанавливают $F_{св}$. Например, при сварке сплава Д16Т на конденсаторных машинах $F_{св} = (1{,}5–2)F_{св1}$.

Упрочняемый нагартовкой сплав АМг6 имеет наибольшее σ^*_{∂} (~160 МПа). Для предотвращения выплесков несколько увеличивают $F_{св}$ (на 15–20 % больше, чем при сварке сплава Д16Т) и смягчают режим, повышая $t_{св}$ в 1,5–2 раза.

Для предупреждения горячих трещин, начиная с толщины 0,5 мм, рекомендуется прикладывать ковочное усилие (циклограмма *б,* рис. 2.18) при $F_к = (2–3)F_{св}$. Детали толщиной более 4 мм из плакированных листов Д16Т, В95Т, АМг6 соединяют при увеличении $F_{св}$ в момент пропускания тока (циклограмма *г,* рис. 2.18). На протяжении всего процесса сварки при этом поддерживается высокая концентрация теплоты, необходимая для полного расплавления тугоплавких плакирующих слоев.

При шовной сварке материалов толщиной до 2 мм рекомендуется циклограмма *б* (рис. 2.20) с непрерывным перемещением деталей. Для больших толщин – циклограмма а с шаговым перемещением и проковкой (рис. 2.20). Рабочая поверхность электродов и роликов для сварки алюминиевых сплавов должна быть сферической формы, а электродные материалы – с повышенной

электропроводимостью (не ниже 85 % электропроводимости меди) и твердостью 100–125 МПа.

Среди алюминиевых сплавов особое положение занимают *сплавы системы Al-Mg-Li*. Литий (5–7 %) повышает удельную прочность сплава 1420 и придает ему иное сочетание физических свойств: удельное электросопротивление, как у низкоуглеродистой стали (13 *мкОм·см*), а температура плавления ниже, чем у сплава Д16 (610 °С). По сравнению с другими алюминиевыми сплавами $I_{св}$ снижают, несколько смягчают режим. Большая газонасыщенность поверхностных слоев неплакированных листов усиливает склонность металла ядра к пористости (при сварке с уменьшенными значениями $F_{св}$). Сплав не склонен к горячим трещинам, однако для предупреждения усадочных раковин применяют ковочное усилие.

При стыковой сварке необходимо применение большой конечной скорости оплавления (до 20 мм/с), большой величины осадки и большой скорости осадки (более 150 мм/с). Алюминиевые сплавы оплавляются при больших плотностях тока перед осадкой (40–60 А/мм^2). Давление осадки при обычной схеме деформации составляет 150–300 МПа. Для сварки алюминиевых сплавов целесообразна осадка с принудительным формированием стыка. Применение формирующих губок устраняет расслоения и рыхлости, которые часто образуются при свободной осадке, и значительно улучшает качество соединений.

Принудительное формирование стыка обеспечивается при сварке со срезанием грата ножами в процессе осадки. При использовании принудительного формирования давление осадки может достигать 500 МПа. На выбор параметров режима существенно влияет состав и состояние сплава. Упрочненные сплавы и сплавы с широким интервалом кристаллизации вваривают с кратковременным нагревом при больших конечных скоростях оплавления (15–20 мм/с). Неупрочненные сплавы можно сваривать длительным нагревом при меньших конечных скоростях оплавления. При сварке деталей большого сечения используют предварительный подогрев сопротивлением при увеличенной установочной длине и плотности тока 5–7 А/мм^2. Подогрев длительностью 30–40 с сплавов АМц и Д16 до 150–200 °С и сплава АМг6 до 300° С не разупрочняет эти сплавы.

2.3.4. Магниевые и медные сплавы

М а г н и е в ы е с п л а в ы (группа 6). Сплавы на основе магния выгодно отличаются от других конструкционных материалов малой плотностью, сравнительно высокой прочностью, хорошей способностью гасить ударные и вибрационные нагрузки, химической стойкостью в щелочах, бензине, маслах. Однако в атмосферных условиях на поверхности образуется толстая, рыхлая и непрочная пленка MgO, плохо предохраняющая сплав от дальнейшего окисления и уменьшающая его коррозионную стойкость во многих средах [6, 9, 10, 12].

Точечной и шовной сваркой соединяют в основном деформируемые сплавы, упрочняемые нагартовкой (МА1, МА8, МА2, МА2-1, МА5, МА10 и др.), и жаропрочные сплавы, упрочняемые термообработкой (МА11, МА13 и др.).

Магниевые сплавы имеют низкое ρ_o (~ 12 *мкОм·см*), поэтому их сваривают на жестких режимах. Однако пониженное σ^*_∂ и высокая пластичность при нагреве позволяют несколько снизить $F_{св}$ без опасности появления внутренних выплесков. Для предупреждения трещин и больших короблений применяют циклограмму *б* (рис. 2.18). Отличительной чертой магниевых сплавов является сильный массоперенос в контакте электрод-деталь. Шовную сварку ведут, используя циклограмму *б* (рис. 2.20). Форму рабочей поверхности и материал электродов выбирают как для алюминиевых сплавов.

М е д н ы е с п л а в ы (группа 7). Латуни и бронзы нашли широкое применение в различных областях техники благодаря высокой электропроводимости, хорошим механическим и технологическим характеристикам. В пластичных α-латунях (Л62) содержание цинка не превышает 38 %, в более прочных $\alpha+\beta$ - и β-латунях его содержание выше. Основными легирующими элементами бронз (БрБ2, БрБНТ1,9, МцЗ, МН10) являются Sn, Al, Mg, Mn, Fe, Cd, Ni, Cr, Be, P, Ti и др.

Благодаря весьма низкому ρ_o, как и у алюминиевых сплавов (6–8 *мкОм·см*), и высокому λ медные сплавы сваривают на жестких режимах: $t_{св} = (0{,}5–0{,}7)t_{св1}$ при большом сварочном токе ($I_{св} = (2{,}5–3)I_{св1}$. Из-за сравнительно невысокого σ^*_∂ (120–130 МПа)

сварочное усилие $F_{св} \approx F_{св1}$. Применяют циклограмму *а* (рис. 2.18) без опасности образования внутренних выплесков. Однако при сварке высокопрочных бронз, прошедших термообработку, необходимо усложнять циклы усилия и тока.

Латуни не склонны к горячим трещинам, но некоторые бронзы с большим интервалом кристаллизации, наличием вредных примесей образуют горячие трещины. Этому способствует также большой коэффициент линейного расширения самой меди. Такие бронзы сваривают по циклограмме *б* (рис. 2.18). Шовную сварку ведут при непрерывном вращении и импульсном включении тока (циклограмма *б*, рис. 2.20). Электроды и ролики устанавливают как для алюминиевых сплавов.

При стыковой сварке латуни из-за опасности выгорания цинка и высокой тепло- и электропроводности также применяют большие конечные скорости оплавления и осадки. Прутки диаметром 10–20 мм из латуней Л62 и ЛС59-1 оплавляют при небольшой постоянной скорости (0,7–1 мм/с), которую постепенно повышают до 2 мм/с, а перед осадкой резко увеличивают до 15 мм/с. Скорость осадки составляет 200–300 мм/с, а давление осадки 250 МПа. Прутки диаметром 12,5 мм сваривают при $2l_0$ = 40 мм, $\Delta_{опл}$ = 12 мм, $\Delta_{ос}$ = 15 мм. При этом свойства соединения из однофазной α-латуни (Л62) близки к свойствам основного металла и допускают волочение, а в соединении $\alpha+\beta$ латуни (ЛС59-1) в результате закалки наблюдается повышение твердости. Пластичность стыка повышается последующей термообработкой.

Медь и латунь сваривают также сопротивлением при большой установочной длине с использованием специальных формующих устройств, локализующих деформацию при осадке.

Чистую медь из-за ее исключительно высоких теплопроводности и электропроводимости сваривают, используя тепловые экраны или электродные вставки из вольфрама, кирита. Возможно также и прямое расплавление с образованием ядра на мощных конденсаторных машинах с очень жестким импульсом тока ($t_{св} < 0{,}02c$). Отсутствие интервала кристаллизации позволяет использовать простейший цикл с постоянным $F_{св}$. Шовную сварку для меди не применяют.

При стыковой сварке меди оплавление проводится по зависимости $s = kt^{312}$ при конечной скорости 20 мм/с. Плотность тока при оплавлении составляет 50–80 А/мм^2, а удельная мощность достигает 2,5 кВА/мм^2. Осадку выполняют со скоростью 200 мм/с при давлении 400–950 МПа.

Никель чаще сваривают двумя импульсами тока: небольшой первый импульс подогревает зону сварки и повышает ее электросопротивление, а второй - сваривает. В паузе электрод охлаждается, и прилипание его к детали уменьшается. С этой же целью иногда на поверхность деталей наносят тонкий слой графита. Вместо подогревного импульса модулируют передний фронт сварочного тока (см. рис. 2.19). Из-за малого σ^*_{∂} и небольшой склонности к горячим трещинам применяют циклограмму *а* с постоянным $F_{св}$ (см. рис. 2.18).

Никель имеет умеренную электропроводность и сравнительно мало окисляется в условиях стыковой сварки. Поэтому он хорошо сваривается оплавлением и сопротивлением. Из-за роста зерна чистый никель целесообразно сваривать при кратковременном нагреве со значительной деформацией при осадке.

Особенности сварки никелевых сплавов определяются их жаропрочностью и наличием элементов, образующих тугоплавкие окислы (хром, алюминий). Соединения, свободные от окисных включений, формируются при интенсивном оплавлении с большой конечной скоростью (8–10 мм/с) при скорости осадки более 60 мм/с. Необходимое давление осадки при сварке непрерывным оплавлением никелевых сплавов достигает 35–50 кгс/мм^2. Для снижения давления осадки и улучшения формирования расплавленного слоя на торцах применяют предварительный подогрев сопротивлением [6, 9, 10, 12].

2.3.5. Тугоплавкие стали

Т у г о п л а в к и е с п л а в ы (группа 8). Условно тугоплавкими считают металлы и сплавы с температурой ликвидуса выше температуры плавления хрома (1875 °С). К ним относят Cr, V, Mo, Ta, Nb, Re, W (в порядке возрастания $T_{пл}$).

Сплавы молибдена представляют собой твердые растворы Ti, Nb, Zr, Co в молибдене. Вольфрам применяют в чистом виде или в качестве сплава с Ta, Re, Nb, Zr, Mo и др. Широкое применение нашли сплавы ниобия с V, W, Mo, Zr, Ti, Re. Ниобиевые сплавы по удельной прочности превосходят другие тугоплавкие сплавы и отличаются хорошими технологическими свойствами.

Сварка тугоплавких химически активных сплавов вольфрама и молибдена осложняется их высокими теплопроводностью и электропроводимостью, а также высокой температурой плавления (3400 °С вольфрама, 2620 °С молибдена). Сочетание подобных свойств вызывает появление в контакте электрод-деталь очень высоких температур, быстрое смятие и подплавление рабочей поверхности электродов. Сварные соединения обладают низкой пластичностью из-за неблагоприятного перераспределения хрупких фаз в зоне сварки. Таким образом, необходимо решить две основные проблемы: уменьшить температуру в контакте под электродом и повысить пластичность соединений.

Известны некоторые способы снижения этой температуры: размещение между электродом и деталью защитных экранов из титана, ниобия; накопление теплоты в контакте деталей при одновременном снижении температуры в приэлектродной зоне (применение многоимпульсного нагрева с резким снижением $F_{св}$ во время пауз); введение в сварочный контакт менее тугоплавких металлов (лент из никелевых сплавов, ниобия, тантала и др.) или плакирующих слоев; применение рельефов. Большинство из этих способов, несмотря на усложнение технологии и некоторое снижение жаропрочности, дают удовлетворительные результаты.

Пластичность соединений частично повышают термообработкой дополнительным подогревным импульсом тока $i''_{под}$ (см. рис. 2.18), меняющим неблагоприятное расположение примесных фаз. Однако окончательно проблема низкой пластичности может быть решена путем дальнейшего рафинирования металлов при их производстве.

Другие тугоплавкие химически активные металлы и сплавы на основе ниобия и тантала удовлетворительно сваривают точечной и шовной сваркой на режимах более жестких, чем для титановых сплавов, с применением циклограммы без ковочного усилия (циклограмма *а,* рис. 2.18).

2.4. Особенности точечной сварки различных соединений

2.4.1. Сварка деталей малой толщины

В электронной и приборной промышленности при производстве схем на печатных платах, гибридных, интегральных схем, герметизации корпусов миниатюрных приборов, мембранных коробок, сильфонов и т. п. в большом количестве свариваются детали очень малой толщины (от 0,005 до 0,5 мм) и сечения из различных металлов и сплавов (сталей, алюминиевых, медных и никелевых сплавов и др.).

Сварка деталей малой толщины, называемая микросваркой, имеет ряд особенностей, создающих дополнительные проблемы в технологии и выборе оборудования: из-за относительно малого собственного сопротивления деталей и малых сварочных усилий резко возрастает роль контактных сопротивлений как источников теплоты; нередко в контактах электрод-деталь выделяется почти столько же теплоты, сколько в сварочном контакте; исключительная жесткость режима сварки повышает чувствительность процесса к выплескам, массопереносу, увеличению рассеяния показателей прочности; большое разнообразие форм, размеров, сочетаний толщины и материалов деталей создает сложности металлургического порядка и затрудняет нахождение оптимальных режимов сварки; более резкое влияние различных переменных факторов на качество сварных соединений (состояния поверхности, $F_{св}$, $d_э$, $t_{св}$, перекос электродов, их неточная установка и взаимный сдвиг, массоперенос, большая крутизна нарастания $I_{св}$, инерционность механизма сжатия, изменения сопротивления сварочного контура машины и др.). Все это усложняет получение высококачественных соединений миниатюрных узлов.

Для получения соединений стабильного качества без повреждения деталей необходимы:

а) строгое дозирование количества энергии, расходуемой на каждую сварку (во избежание непровара или прожога) в сочетании с небольшим, но точно контролируемым $F_{св}$; малое усилие необходимо для того, чтобы тепло выделялось в основном в зоне контакта между деталями за счет относительно большого кон-

тактного сопротивления, а постоянство $F_{св}$ требуется в связи с тем, что при малых усилиях $r_к$ изменяется очень резко;

б) малая продолжительность импульса тока, способствующая концентрации тепловыделения в зоне соединения деталей, уменьшающая их общий нагрев, что облегчает сварку разноименных материалов [1].

Этим условиям наиболее полно отвечают конденсаторные машины, осуществляющие сварку импульсом тока, получаемым во вторичной обмотке сварочного трансформатора при разряде конденсаторов на его первичную обмотку. Продолжительность импульса сварочного тока измеряется тысячными долями секунды. С увеличением коэффициента трансформации сварочного трансформатора сварочный ток уменьшается, а длительность импульса соответственно растет. Этим способом регулируется жесткость режима конденсаторной сварки. На конденсаторных машинах успешно свариваются разноименные материалы, например, никель с молибденом, вольфрамом и платинитом; медь с латунью и бронзой; титан с молибденом и вольфрамом и многие другие.

Высокую устойчивость качества микросварки удается обеспечить лишь при ужесточении требований к машине (в отношении постоянства параметров, малой инерционности механизма сжатия, достаточной жесткости сварочного контура), к технологии (в отношении тщательной отработки всех элементов технологического процесса, выбора оптимального режима, широкого использования контрольных приборов), к квалифицированному обслуживанию машин (в отношении регулярной проверки состояния сварочного контура, особенно его контактов, механизмов сжатия и других систем) [1].

2.4.2. Сварка деталей большой толщины

При толщине деталей более 10 мм возникает ряд трудностей: большое шунтирование тока в ранее сваренную точку, сильный нагрев и смятие рабочей поверхности электродов, склонность к появлению в ядре крупных дефектов усадочного происхождения. К тому же обработка поверхности и точная сборка деталей представляют дополнительную проблему. Поверхность обрабатывают вращающимися щетками или дробью.

Сборку обычно ведут в приспособлениях с мощными зажимами и фиксаторами.

Для уменьшения шунтирования точечную сварку выполняют с увеличенным шагом. Например, для деталей из конструкционных сталей толщиной 10 мм $t_ш$ = 100÷120 мм. Для снижения температуры электродов используют жесткие режимы или пульсирующий нагрев с постоянным сварочным усилием. Такой цикл уменьшает среднюю температуру рабочей поверхности (за счет охлаждения электродов во время паузы) и в то же время накапливает теплоту в сварочном контакте деталей. Для предупреждения усадочных дефектов применяют ковочное усилие (циклограмма *б*, рис. 2.18). Имеются примеры сварки деталей толщиной 30 мм.

2.4.3. Сварка пакета из трех и более деталей

Такое сочетание осложняет процесс из-за появления дополнительных контактов и трудности надежного проплавления тонких наружных элементов.

При сварке пакета необходимо иметь литое ядро, которое обеспечивает проплавление всех деталей в независимости от соотношения толщин.

Если с внешней стороны находятся более толстые или близкие по толщине детали, точечную и шовную сварку выполняют без особой сложности со сквозным проплавлением центральной (рис. 2.21).

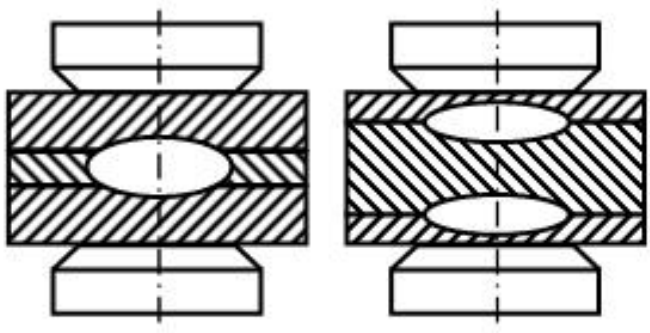


Рис. 2.21. Соединение пакета из трех деталей

В пределах соотношения толщин 1:3 качество сварки получается удовлетворительным, однако стабильные результаты определяются хорошей подготовкой поверхности и сборкой с мини-

мальными зазорами. При расположении снаружи тонких деталей применяют жесткие режимы. В сложных случаях используют технологические способы управления смещением плоскости теплового равновесия, как при сварке деталей неравной толщины.

2.4.4. Сварка деталей неравной толщины

При соотношении толщин 1:3 и более процесс осложняется трудностью получения номинальной (расчетной) зоны взаимного расплавления. Это происходит из-за несовпадения плоскости теплового равновесия со сварочным контактором (*e*, рис. 2.22) и сопровождаются малым и неустойчивым проплавлением тонкой детали. Вероятность непровара возрастет с увеличением разницы в толщине.

По сравнению со сваркой деталей одинаковой толщины при сварке деталей разной толщины усиливается поток теплоты в электроды и окружающую среду со стороны более тонкой детали. На периферии контакта между деталями увеличивается плотность тока. Все это приводит к смещению литого ядра относительно плоскости соединения деталей в деталь большей толщины (рис. 2.22).

Проплавление тонкой детали уменьшается, что может привести к полному непровару.

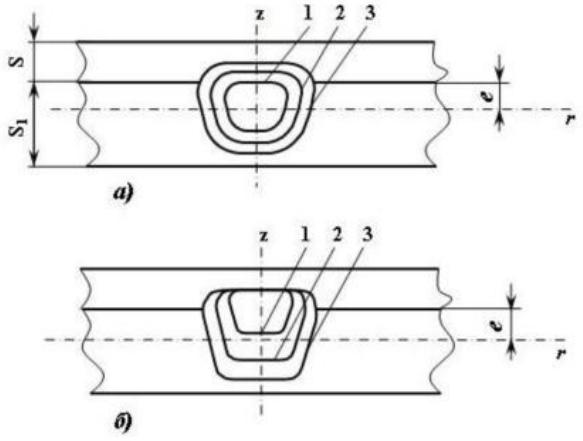


Рис. 2.22. Кинетика формирования литого ядра в деталях разной толщины (*r* – плоскость теплового равновесия; *e* – расстояние между этой плоскостью и сварочным контактом):
а – мягкий режим; *б* – жесткий режим; 1–3 – изотермы плавления соответственно в начальной, средне и конечной стадиях сварки

На мягком режиме изотерма плавления преимущественно зарождается в центре сечения пакета (в толстой детали) и затем равномерно распространяется во все стороны. Таким образом, она лишь в конце цикла сварки захватывает тонкую деталь (рис. 2.22, *а*). Процесс характеризуется неустойчивостью глубины проплавления, большим объемом жидкого металла толстой детали, усиленной деформацией тонкой, повышенным износом электродов.

На жестком режиме в начале процесса изотерма плавления равномерно захватывает приконтактные области тонкой и толстой деталей. Затем под влиянием теплоотвода изотерма смещается в толстую деталь, к плоскости теплового равновесия (рис. 2.22, *б*). При необходимом увеличении тока возникают внутренние и наружные выплески. Однако при обычной схеме сварки жесткий режим предпочтительнее.

Для надежного проплавления тонкой детали существует много способов. Они основаны на искусственном сближении плоскости теплового равновесия с плоскостью сварочного контакта.

Основными направлениями решения этой задачи являются уменьшение отвода теплоты от тонкой детали и увеличения тепловыделения в ней (и в контакте между деталями).

Первое направление реализуют обычно на мягких режимах.

Некоторого увеличения проплавления тонкой детали достигают размещением с ее стороны электрода с малой рабочей поверхностью и меньшей теплопроводности. Со стороны толстой детали рабочую поверхность и теплопроводность увеличивают. Однако этот способ незначительно увеличивает проплавление тонкой детали (10–15 %), а применение электродов с малой теплопроводностью ограничено из-за прилипания электрода при сварке деталей из алюминиевых и магниевых сплавов.

Эффективно размещение между электродом и тонкой деталью съемного теплового экрана из металла с меньшей теплопроводностью в виде ленты толщиной 0,05÷0,3 мм (рис. 2.23, *а*). Экран аккумулирует теплоту в тонкой детали, а часто и сам служит дополнительным источником теплоты. Комбинируя состав и толщину ленты, плоскость теплового равновесия легко сдвигают к тонкой детали и добиваются ее устойчивого проплавления. При

смещении плоскости в тонкую деталь можно получить даже сквозное проплавление последней.

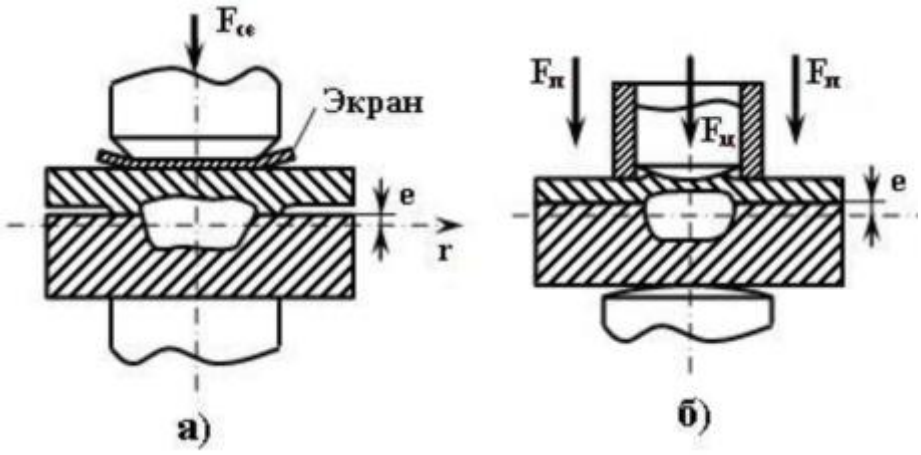


Рис. 2.23. Точечное соединение деталей разной толщины:
а – с помощью экрана; *б* – с дополнительным регулируемым обжатием периферийной зоны

Второе направление реализуют главным образом на жестких режимах. Для этого используют в основном два варианта: фокусировку сварочного тока и дополнительное обжатие деталей вокруг электродов.

Площадь внутреннего контакта ограничивают с помощью рельефов. Для повышения эффективности концентрации тока вокруг рельефов иногда помещают неэлектропроводящие тугоплавкие слои. Плотность тока в тонкой детали повышают, уменьшая площадь электропроводимости самого электрода вблизи его рабочей поверхности с помощью кольцевой проточки, кольца из сплава с малой проводимостью, либо небольшой центральной вставки из сплава с повышенной электрической проводимостью. Для концентрации тока в тонкой детали предложено также накладывать дополнительное магнитное поле. Сложность, низкая стойкость электродов и небольшой эффект увеличения проплавления тонкой детали ограничивают практическое использование перечисленных вариантов.

Весьма эффективен способ сварки с дополнительным кольцевым обжатием тонкой детали вокруг электрода. Обжатие уплотняющего пояска меняет электротермодеформационный процесс (рис. 2.23, *б*). Общее усилие сжатия $F_{св}$ специальным электродным устройством разделяют на два усилия: $F_{ц}$, приклады-

ваемое в центре, и F_n, сжимающее периферийный участок точки. Этот способ почти полностью исключает выплески и применяется на жестких и мягких режимах. Способ обеспечивает глубину проплавления тонкой детали 30–70 %, но нуждается в дальнейшем усовершенствовании с целью повышения стойкости электрода к загрязнению, а также в создании надежных и компактных универсальных электродных устройств для кольцевого обжатия точек.

2.4.5. Сварка деталей из разноименных материалов

Различия физико-механических свойств и химического свойства обусловливают разницу в ρ_0, λ, σ^*_∂ и $T_{пл}$. Из-за неодинакового выделения и отвода теплоты ядро приобретает специфическую грибообразную форму (рис. 2.24). Диаметр ядра и глубина проплавления увеличивается в деталях с высоким ρ_0, меньшим λ и $T_{пл}$. Причины снижения размеров ядра в детали с большей теплопроводностью такие же, как при сварке одноименных деталей различной толщины. Аналогичны и технологические способы получения номинального (расчетного) ядра в сварочном контакторе путем смещения плоскости теплового равновесия к стыку, предупреждения выплесков при повышении плотности тока. Проблемы сварки разноименных сплавов часто усложняется различной толщиной деталей. Однако, если теплопроводность и температура плавления материала тонкой детали ниже, чем толстой, сварка облегчается.

Обычно химически совместимы сплавы, построенные на одной основе или имеющие разную основу, но образующие между собой непрерывный ряд твердых растворов (например, АМг6 + Д16Т, 1420 + Д16, ОТ4 + ВТ5, Ст3 + 30ХГСА, а также Nb + Zr, Fe + V, Ti + V, Ti + Zr, Ni + сталь и другие). В большинстве случаев сплавы на разной основе оказываются химически несовместимыми, так как образуют в ядре сплавы с неблагоприятными свойствами (хрупкие химические соединения, механические смеси). Например, при сварке алюминиевых и магниевых сплавов, имеющих близкие физико-механические свойства, в ядре образуются хрупкие интерметаллиды. Соединения разрушаются. Та-

кое же явление возникает при соединении сплавов титана со сталью, алюминиевыми сплавами и многих других пар металлов.

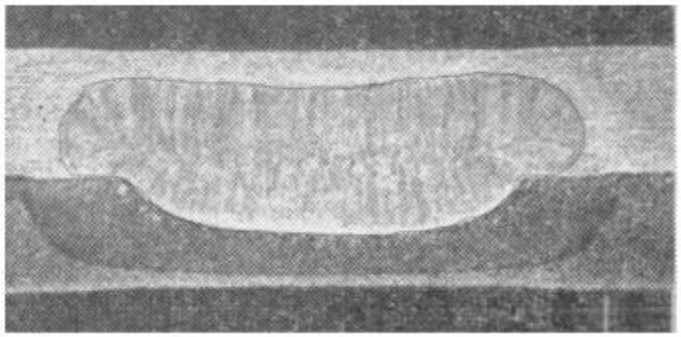


Рис. 2.24. Макроструктура сварной точки сталей 12Х18Н10Т и 30ХГСА (1,5+1,5 мм)

2.5. Особенности технологии стыковой сварки различных деталей

Сварка кольцевых деталей. Особенность сварки кольцевых деталей – шунтирование тока и действие сил, возникающих от упругой деформации кольца при осадке. Оба фактора вызывают необходимость использования более мощного оборудования, чем при сварке разомкнутых деталей. Потребляемая мощность из-за шунтирования возрастает на 15÷50 %, и резко увеличивается усилие зажатия концов кольца. Для облегчения деформации при сварке и снижения тока шунтирования кольцо до сварки подогревают (в зажимах машины). Иногда для увеличения индуктивного сопротивления на кольцо надевают разъемный магнитопровод. Кольцевые детали в зависимости от сечения сваривают непрерывным оплавлением, оплавлением с подогревом, импульсным оплавлением.

Режим сварки импульсным оплавлением (мягкий режим) кольца диаметром 1500 мм из АМг6 сечением 1200 мм^2 характеризуется следующими параметрами: U_{20max} = 13,2 В; U_{20min} = 8 В; $f_к$ = 3,5; $A_к$ = 0,3 мм; $\Delta_{опл}$ = 45 мм; $\upsilon_{опл.к}$ = 13 мм/с; $p_{ос}$ = 250 МПа; $\Delta_{ос}$ = 45 мм; $t_{св}$ = 120 с, а режим сварки непрерывным оплавлением с подогревом кольца из стали 12Х18Н9Т сечением 3215 мм^2: U_{20} = 9 В; $t_{под}$ = 70 с; $t_{имп}$ = 6 с; $\Delta_{опл}$ = 35 мм; $\upsilon_{опл.к}$ = 3,5 мм/с; $t_{опл}$ =

75 с; $\Delta_{ос}$ = 15 мм; $\Delta_{ос.т}$ = 11 мм. Общая схема технологического процесса сварки кольцевых деталей состоит из следующих последовательно выполняемых операций: вальцовка заготовки, зачистка концов, подгибка концов (для надежного закрепления в зажимах); сварка, удаление грата, растяжка.

Сварка рельсов. Нормальные железнодорожные рельсы имеют сечение 5000÷8000 мм^2 и прокатываются из стали, содержащей до 0,9 % С. Рельсы сваривают на стационарных или в полевых условиях на передвижных машинах.

При сварке рельсы зажимаются плоскими электродами на длине 150÷200 мм с двусторонним подводом тока. Сложность сварки рельсов обусловлена их конфигурацией, что затрудняет равномерный нагрев торцов и деформацию металла. Качество сварки повышают за счет интенсификации оплавления перед осадкой. Для этого обычно увеличивают $\upsilon_{опл.к}$ до 0,9–1,2 мм/с. Для сварки рельсов (сечением 6000 мм^2) рекомендуют следующие параметры режима:

1) при сварке оплавлением с подогревом: U_{20} = 9 В; $t_{под}$ = 240 с; $t_{имп}$ = 5,5 с; $\Delta_{опл}$ = 20 мм; $\upsilon_{опл.ср}$ = 1 мм/с; $p_{ос}$ = 40÷50 МПа; $\upsilon_{ос}$ = 15мм/с; $\Delta_{ос}$ = 10 мм; $t_{св}$ = 120 с;

2) при сварке оплавлением с программным изменением напряжения: $U_{20нач}$ = 7 В; U_{20min} = 4 В; $U_{20кон}$ = 5 В; $\upsilon_{опл.ср}$ = 0,9 мм/с; $\Delta_{опл}$ = 30 мм; $j_{опл}$ = 2,8 А/мм (перед осадкой); $\Delta_{ос}$ = 10 мм; $t_{св}$ = 120 с;

3) при сварке импульсным оплавлением (жесткий режим): U_{20} = 6,3 В; $\Delta_{опл}$ = 7 мм; $\upsilon_{опл.к}$ = 0,9 мм/с; $f_к$ = 25 Гц; $A_к$ = 0,4 мм; $\Delta_{ос}$ = 6 мм; $t_{св}$ = 35 с (удельная мощность 0,03 кВА/мм$_2$).

Для улучшения свойств сварных соединений после сварки проводят нормализацию или отпуск.

Сварка труб. Стыковую сварку труб применяют в котлостроении, при изготовлении нефтяного оборудования, при строительстве магистральных и промысловых трубопроводов и т. д. При сварке труб требуется точное совпадение свариваемых кромок, как правило, обеспечение проходного отверстия не менее 80–90 % внутреннего диаметра трубы и равномерный подвод тока по периметру.

Трубы диаметром до 60–100 мм сваривают непрерывным оплавлением или оплавлением с подогревом. В зависимости от же-

сткости трубы применяют электроды с цилиндрической и призматической поверхностью. При сварке непрерывным оплавлением труб из низкоуглеродистой и легированной стали процесс начинают при малой скорости оплавления и заканчивают при $\upsilon_{опл.к}$ = 6–10 мм/с (обычно подвижная плита перемешается по закону $s_n = kt^2$ или $s_n = kt^3l^2$). Для сварки стальной трубы (60×3 мм) сечением 550 мм^2 рекомендуется следующий режим: U_{20} = 6,5÷7 В; $2l_0$ = 70 мм; $\Delta_{опл}$ = 15 мм; $\upsilon_{опл.ср}$ = 1÷1,5 мм/с; $\Delta_{ос}$ = 4,5 мм; $\Delta_{ос.т}$ = 3 мм.

Толстостенные трубы большого диаметра со стенками 12–50 мм сечением 4000÷32000 мм^2 сваривают оплавлением с подогревом. Для сварки трубы из низкоуглеродистой стали диаметром 200 мм, сечением 20000 мм^2 применяют следующий режим сварки: U_{20} = 9,3 В; $2l_0$ = 420 мм; $t_{под}$ = 540 с; $t_{имп}$ = 6 с; $\Delta_{опл}$ = 23 мм; $\upsilon_{опл.ср}$ = 0,6 мм/с; $\Delta_{ос}$ = 15 мм; $\Delta_{ос.т}$ = 12 мм. Иногда для защиты от окисления внутрь трубы помещают вещества, выделяющие при нагреве водород и углекислый газ (например, шлаковые тампоны, смоченные бензином, и др.).

Магистральные трубопроводы больших диаметров (700–1450 мм) сваривают непрерывным оплавлением с программным изменением напряжения и скорости сближения торцов. Для сварки применяют установки, оснащенные кольцевыми или блочными трансформаторами, обеспечивающими равномерный подвод тока по периметру трубы. При этом резко снижается сопротивление сварочного контура (до 12–15 мкОм), и устойчивое оплавление идет при малой удельной мощности (0,015–0,025 кВА/мм^2). Давление осадки обычно составляет 50 МПа, $\upsilon_{опл.ср}$ = 1 мм/с. Для облегчения возбуждения оплавления кромки труб скашиваются под небольшим углом.

Сварка заготовок инструмента. Для экономии качественных инструментальных сталей из нее делают рабочую часть инструмента, а хвостовую часть – из дешевой углеродистой стали. Сварку выполняют оплавлением или оплавлением с подогревом. Технология сварки определяется в основном свойствами этих сталей. Низкие теплопроводность и электропроводимость инструментальной стали компенсируются при сварке большей (на 30–50 %) установочной длиной заготовки из углеродистой стали; склонность к образованию трещин из-за способности стали ин-

тенсивно закаливаться снижают применением замедленного охлаждения после сварки и последующего отжига; чувствительность стали к перегреву с образованием участков хрупкой структуры предупреждается удалением перегретого металла путем повышения давления осадки. Параметры режима сварки и последующей термообработки уточняют в зависимости от свойств используемой инструментальной стали [6, 9, 10, 12].

2.6. Сборочно-сварочные приспособления

Технология производства конструкций с применяем контактной сварки кроме основных сварочных операций включает вспомогательные операции, к которым относят подготовку поверхности, загрузку, сборку и съем деталей с приспособлений и машин, перемещение деталей при сварке, обработку сварных швов, правку и др. Большая часть времени при изготовлении сварных конструкций (до 70–80 %) затрачивается на эти вспомогательные операции. Сама операция сварки (получение соединения) практически полностью автоматизирована, а степень механизации вспомогательных операций не превышает в ряде случаев 10 %. Трудоемкость вспомогательных операций значительно превышает трудоемкость сварки, что снижает технико-экономическую эффективность процесса. Снижение общей трудоемкости процесса сварки возможно за счет применения средств механизации: специальных приспособлений и устройств для установки (закрепления в нужном положении) и подачи сварного узла в рабочее пространство машины.

В опытном и мелкосерийном производстве используют несложные сборочные приспособления, различные немеханизированные поддерживающие устройства. Для массового производства характерно применение специализированных машин, механизированных приспособлений, машин-автоматов и промышленных роботов. Сварочные машины, средства механизации и автоматизации располагают по ходу технологического процесса и организуют в механизированные поточные или автоматические линии.

Сборочно-сварочным приспособлением называют устройство для сборки и взаимной фиксации отдельных деталей сборочной единицы (изделия), прихватки и сварки. Приспособление по-

вышает точность и производительность операции, улучшает условия труда, повышает безопасность работ.

Сборочно-сварочные приспособления классифицируют по нескольким признакам:

по назначению – универсальные, специальные;

по характеру выполняемых операций – сборочные, сборочно-сварочные, сварочные;

по размерам и сложности – главные, крупные, средние, мелкие;

по способу монтажа и характеру работы – переносные, стационарные, передвижные (напольные, подвесные), поворотные;

по отношению к сварочной машине – отдельно от сварочной машины, на сварочной машине, со встроенной сварочной машиной.

Специфика контактной сварки определяет следующие особенности конструирования сборочно-сварочных приспособлений.

1. Детали устройств и приспособлений, вводимых в сварочный контур машины, рекомендуется изготовлять из немагнитных материалов – алюминиевых сплавов, немагнитных сталей и т. п.

2. Токоведущие элементы машины должны быть изолированы от приспособления во избежание шунтирования тока и повреждения (прожога) поверхности детали.

3. Узлы, предназначенные для точечной и шовной сварки, необходимо демпфировать для компенсации износа электродов и прогиба консолей, например, устанавливать на плавающие опоры, что дает возможность всегда располагать узел на нижнем электроде независимо от его длины (износа рабочей поверхности).

4. Вид приспособлений – переносные или стационарны, определяется размерами и массой изделий.

5. Приспособления не должны затруднять свободный доступ к месту сварки.

6. Приспособления для точечной сварки должны обеспечивать точное позиционирование деталей относительно друг друга, их надежное закрепление; подачу свариваемого узла в контур машины и перемещение деталей на заданный шаг или угол поворота.

7. Приспособления для стыковой сварки должны обладать достаточной жесткостью, обеспечивая тем самым соосность деталей при осадке.

В конструкции приспособлений рекомендуется использовать унифицированные узлы: редукторы, шаговые механизмы, сварочные головки, элементы пневмоэлектрической аппаратуры и т. п.

Универсальные приспособления применяют в единичном и мелкосерийном производстве. К этим приспособлениям относят наборы фиксирующих, опорных и зажимных элементов (винтовые струбцины, пружинные зажимы, ручные тиски, и др.).

Универсальные приспособления используют для различных узлов, затраты на их изготовление невысокие, но работа на них менее производительна и обычно более трудоемка.

В крупносерийном и массовом производстве применяют только специальные приспособления. Они обеспечивают более точную сборку, высокую производительность, облегчают условия труда, но их проектирование и изготовление требует больших затрат. Основание приспособлений – стальная плита пли сварная рама, на которой монтируют фиксирующие и зажимные устройства.

Сборочные единицы обычно собирают, прихватывают и сваривают в этих приспособлениях. Для сварки чаще всего используют подвесные точечные машины. Иногда в приспособления встраивают точечные или многоэлектродные машины. Такие приспособления усложняются дополнительными токоведущими элементами (шины, опорные токоподводы), сварочными трансформаторами и аппаратурой управления циклом сварки.

Если на изделии основной объем сварки выполняется на многоэлектродных машинах, то сборочные приспособления устанавливают на столе машины или на сварочном штампе.

Мелкие приспособления часто монтируют на элементах вторичного контура сварочных машин. При необходимости приспособление вращается вокруг горизонтальной, вертикальной или наклонной оси. Приспособление может также перемещаться поступательно по конвейеру или иметь челночное перемещение относительно рабочей зоны сварочных машин.

Приспособления в зависимости от их сложности разделяют на главные, крупные, средние и мелкие. В основу такого деления положены их размеры, масса и стоимость [6, 9, 10, 12].

Главные приспособления предназначены для окончательной сборки и сварки крупного изделия. Приспособления оснащаются прижимами и зажимами с пневматическим или гидравлическим

приводом. В таких приспособлениях окончательно формируются геометрические формы и размеры крупных пространственно сложных деталей. Эти приспособления часто оснащают встроенными точечными машинами. Они иногда передвигаются вдоль линии сборки напольными конвейерами. Такое же назначение имеют сборочно-сварочные стенды. В них также проводится сборка и сварка пространственно сложных деталей в стационарном положении.

К мелким приспособлениям относят шаблоны, фиксаторы и элементарные приспособления для сборки и сварки мелких несложных деталей. Они состоят из основания в виде пластины или рамки, на которых установлены упоры и фиксаторы. Оператор обычно детали прижимает рукой. Иногда применяют облегченные прижимы. К стационарной машине для сварки приспособление с изделием подносят вручную.

Значительную группу сборочно-сварочной оснастки составляют сварочные приспособления, предназначенные для ориентации и перемещения детали относительно электродов сварочных машин. Эти приспособления выполняют обычно как приставку к универсальным сварочным машинам с соответствующей их модернизацией.

При проектировании приспособлений необходим чертеж детали и технология сборки и сварки. Важно установить последовательность всех операций, рациональную разбивку изделия на отдельные узлы, правильно наметить базы фиксации отдельных узлов и согласовать их по всем позициям сборки и сварки. Конструкция приспособления зависит также от программы выпуска изделий.

Проектирование следует начинать с тщательного изучения опытных образцов изделия. При этом часто используют методы моделирования. Из пластмассы, стеклопластика, полистирола в масштабе изготовляют разборную модель изделия и его основные узлы, что помогает быстрее и более точно наметить общую схему приспособления.

Дальнейшие работы выполняют в следующей последовательности: определяют базовую деталь и устанавливают базы фиксации (отверстия, поверхности); разрабатывают принципиальную схему приспособления, его конструктивную схему и эскизную компоновку; расчетом или конструктивно определяют

размеры его основных узлов; разрабатывают общий вид приспособления и рабочие чертежи всех узлов и деталей.

При разработке приспособлений следует стремиться максимально унифицировать их типовые узлы: плиты и рамы основания, опорные стойки, зажимные устройства, фиксаторы, опоры и др. При разработке сложных приспособлений необходимо макетировать отдельные узлы, изготовляя их из дерева и пластмассы.

Конструкцию сборочно-сварочных приспособлений разрабатывают с учетом следующих положений:

- закладка деталей в приспособление и их фиксация должны быть простыми и удобными;
- прижимы следует располагать против опор;
- прижимные и зажимные устройства должны быть быстродействующими с пневматическим или гидравлическим приводом, допускающим их групповую работу. Ручной привод допустим лишь в тех случаях, когда положение деталей, устанавливаемых на базовую деталь, неустойчиво и их требуется поддерживать рукой;
- фиксаторы, зажимы и прижимы, расположенные близко от места сварки, нужно защищать от брызг металла;
- к местам сварки следует обеспечить свободный доступ оснастки сварочной машины с возможно меньшим вылетом;
- при необходимости уменьшить следы от точечной сварки лицевой поверхности детали устанавливают охлаждаемую токопроводящую пластину из медных сплавов;
- в целях стабилизации сварочного тока части приспособлений, входящие в контур сварочной машины, должны иметь минимальную массу или их следует изготовлять из немагнитных материалов;
- после сварки узел нужно снимать легко и быстро, применяя съемники с рычажным или пневматическим приводом.

Конструкция приспособления должна быть согласована с применяемыми транспортными устройствами. При разработке конструкций также учитывают периодическое применение мастер-макетов для изготовления и проверки приспособления в эксплуатации.

Конструкция приспособления должна удовлетворять правилам техники безопасности.

При разработке приспособлений различного типа для сборки и сварки деталей широко применяют унифицированные узлы, что ускоряет их проектирование, снижает стоимость и улучшает качество.

К унифицированным узлам относят различного типа фиксаторы, зажимы, прижимы, стойки основания приспособлений и др. Фиксаторы применяют для ориентирования собираемых деталей в приспособлении. Прижимы и зажимы – наиболее распространенные элементы приспособлений. Их используют для закрепления установленных в приспособлениях деталей. К прижимам относят силовые устройства, прижимающие собираемые детали к упорам. Устройства, прижимающие детали с двух противоположных сторон, называют зажимами.

По способу создания усилия зажатия эти устройства разбивают на механические, пневматические, гидравлические, комбинированные. Механические прижимы с клиновыми и винтоеыми зажимными устройствами относят к медленно действующим системам. Их иногда используют в приспособлениях для контактной сварки. Применение откидных рычагов несколько повышает их быстродействие.

Более широко применяют быстродействующие рычажные прижимы разнообразной конструкции. Шарнирно-рычажные механизмы обеспечивают прижим за счет перехода рычагов через мертвую точку. Конструкции их различают по размерам, соотношению плеч рычагов, расположению рукояток. Основной недостаток их – индивидуальный привод и необходимость приложения существенного физического усилия.

В приспособлениях для сборки и сварки штампо-сварных конструкций широко используют устройства с пневматическим приводом. Они позволяют осуществлять групповую работу, сокращать время действия, применять дистанционное управление, облегчать условия труда. В качестве силовых элементов в этих конструкциях поршневые или диафрагменный пневмокамеры.

При необходимости уменьшить диаметр рабочих цилиндров применяют гидравлический привод.

Компонующим элементом приспособления обычно является стальная плита, устанавливаемая на сварных стойках. В плите

предусматривают вырезы для облегчения и увеличения доступности к месту сварки. Иногда вместо плиты используют сварную конструкцию в виде рамы, изготовленной из стальных прокатных профилей. При необходимости приспособление делают поворотным вокруг вертикальной или горизонтальной оси.

При сварке деталей на многоэлектродных и рельефных машинах приспособление устанавливается на подвижном столе многоэлектродной машины или на нижней плите рельефной машины. Фиксирующими устройствами являются электроды и токоподводы различной конструкции.

2.7. Дополнительная обработка сварных узлов

В результате точечной и шовной сварки в узлах появляются сварочные деформации, напряжения и перемещения (коробления). Деформации бывают местные (зазоры между деталями, вмятины от электродов) и общие (сокращение длины шва, уменьшение диаметра и длины обечайки с кольцевыми швами и т. п.). Если жесткость деталей, неодинакова, возникают изгиб, потеря устойчивости, кручение узлов.

Снижение уровня остаточных напряжений и деформаций – одна из важнейших задач конструктора и технолога.

Коробления при точечной, шовной (и рельефной) сварке возникают в результате неравномерного термомеханического воздействия на металл при нагреве и охлаждении в зоне сварки, структурных превращений, несовершенства технологии сборки, прихватки, сварки.

Неравномерное термомеханическое воздействие обусловлено неравномерным нагревом и несвободной пластической деформацией в условиях действия внутренних и внешних сил.

Коробление усиливается при сварке металлов с увеличенным коэффициентом линейного (объемного) расширения α (β). Роль теплопроводности двояка: увеличение λ объективно способствует выравниванию температурного поля и уменьшению деформаций, но одновременно расширяется зона высоких температур, уменьшается сопротивление деформации, и общая пластическая деформация может возрастать. Обычно коробление в дета-

лях из коррозионно-стойких сталей больше, чем из низкоуглеродистых, а на алюминиевых сплавах больше, чем на сталях.

Деформация возрастает с увеличением объема расплавленного металла. Например, сокращение длины шва при шовной сварке сталей существенно выше (0,2–0,3 мм на 1 м), чем при точечной (~ 0,1 мм). Существенное влияние на остаточные деформации оказывают конструкция узла (конфигурация шва, соотношение жесткости деталей) и режимы сварки. Например, увеличение $t_{св}$ на мягких режимах расширяет зону пластической деформации и усиливает коробление.

При охлаждении сплавов с мартенситным превращением (например, Х15Н5Д2Т) вместо укорочения может происходить удлинение шва из-за распада аустенита при низких температурах с образованием мартенсита, объем которого больше, чем у феррита.

Технологические деформации часто связаны с увеличенными зазорами, неточным расположением деталей, неправильной последовательностью прихватки и сварки. Одно из условий правильной последовательности прихватки – это равномерное распределение сборочных зазоров.

Технологические коробления могут также возникать при большой разнице в размерах и форме рабочей поверхности электродов (роликов) – изгиб в сторону электрода с меньшей поверхностью. Взаимное горизонтальное смещение электродов – еще одна из причин коробления. Смещение возникает из-за упругого изгиба электродов, консолей и электрододержателей под действием $F_{св}$. Влияние смещений электродов уменьшается, если сварку вести в направлении, перпендикулярном плоскости рабочего пространства машины, или на машинах портального типа.

Существует много способов снижения сварочных деформаций и перемещений. Их можно разбить на две большие группы: *предупреждающие и исправляющие* (правка). Среди предупреждающих способов эффективно применение *Fк*, «вытягивающего» шов, а также дополнительного кольцевого обжатия деталей вокруг электродов, препятствующего течению металла в зазор. Если, несмотря на меры предупреждения, коробления остаются выше допускаемых, применяют правку. В зависимости от материала, размеров и формы узла используют термические, термомеханические и механические способы правки.

Термообработку узла с общим нагревом проводят сравнительно редко, так как она создает свои деформации тонкостенных деталей. Чаще ее выполняют сразу после точечной сварки пропусканием второго импульса. Однако главная цель такой термообработки – улучшение структуры и свойств соединений. Эффективен местный нагрев выпуклого участка многопламенными газовыми горелками до температуры пластического течения металла. Из-за несвободного расширения деталь в этом месте утолщается, а после остывания сокращается.

Термомеханические способы основаны на одновременном воздействии высокой температуры, дилатометрического эффекта и внешнего усилия. Для сокращения вытянутых участков деталь нагревают между электродами точечной машины до расплавления в центре. При этом используют явление сокращения шва после сварки.

Механические способы основаны на холодной пластической деформации шва или околошовной зоны. Шов обстукивают стальным пуансоном с усилиями, достаточными для некоторой деформации металла. Характер процесса напоминает действие ковочного усилия.

Рассмотренные выше способы снижения деформаций повышают точность сварных конструкций. Однако после сварки узлов, имеющих базовые и посадочные поверхности, применяют механическую обработку: точение, фрезерование, шлифование, развертывание и др. Для этого на свариваемых деталях предусматривают технологический припуск на обработку.

После стыковой сварки удаляют грат, иногда и местное утолщение зоны сварки шва. Способы удаления выбирают в зависимости от конфигурации деталей, возможности сварочного оборудования и системы организации производства.

При небольших компактных сечениях деталей (стержни, наружные швы труб) грат и утолщение удаляют в зажимах сварочной машины при нагретом металле специальными стальными ножами, на металлорежущих станках, специальными разъемными кольцами с встроенным в них вращающимся металлорежущим инструментом.

После сварки рельсов грат срезают протягиванием горячего стыка через специальные ножи. Для повышения циклической

прочности соединений рельсы по периметру дополнительно строгают и шлифуют.

После сварки полос швы обрабатывают резцовыми и плужковыми гратоснимателями.

Наибольшие трудности возникают при обработке сварного шва внутри трубных деталей. В прямых трубах малого и среднего диаметра грат срезают дорном, который насаживают на штангу и проталкивают через горячий стык с использованием пневматического цилиндра. Иногда для более тщательного удаления высаженного металла применяют специальный режущий инструмент. Если труба имеет изгибы, то используют стальные снаряды, которые разгоняют в трубе сжатым воздухом. Движущийся снаряд сбивает грат. В трубах большого диаметра сварной шов обрабатывают специальными вращающимися гратоснимательными устройствами с установленными в них резцами или бойками.

При обработке стыков сложной формы, а также при единичном изготовлении деталей широко используют переносные пневматические зубила и вращающиеся шлифовальные круги.

2.8. Контроль при контактной сварке

2.8.1. Способы и организация контроля

Качество соединений, выполненных контактной сваркой, определяется в основном наличием сплошной металлической связи по заданной площади соединения. При точечной, шовной и в большинстве случаев при рельефной сварке эта площадь оценивается размерами зоны взаимного расплавления деталей.

При стыковой сварке металлическая связь должна быть установлена по всей площади торцов соединяемых деталей. Невыполнение этих требований влечет образование непроваров. Непровары, несплошности (трещины, раковины), выплески, недопустимые изменения свойств металла, а также несоблюдение установленного внешнего вида, формы и расположения швов квалифицируются как дефекты.

Существующий уровень технологии и сварочного оборудования не может гарантировать полное отсутствие дефектов в сварных соединениях. Их возникновение связано с воздействием

на процесс сварки различного рода случайных возмущений, которые обычно разделяют на возмущения от произвольных отклонений технологических факторов (величины сборочных зазоров, размеры рабочей поверхности электродов, показатели качества подготовки поверхности деталей, отсутствие надежного закрепления деталей в зажимах стыковой машины и т. п.) и на возмущения от произвольных колебаний электрических и механических параметров сварочного оборудования в процессе сварки.

При точечной, шовной и рельефной сварке непровары в некоторых случаях удается обнаружить внешним осмотром, упругим отгибанием кромки при малой толщине деталей. Однако, даже используя радиационные методы контроля, например, просвечивание рентгеновскими лучами, обнаружить непровар не всегда удается.

Если в конструкциях, свариваемых точечной, шовной или рельефной сваркой, по каким-либо причинам не предусмотрено образование взаимного расплавления деталей, установить качество сварки не представляется возможным. В таких случаях методы контроля должны оговариваться специальными техническими условиями.

Исправляют непровар повторной постановкой точек или подваркой дуговой сваркой после разделки шва Внутренние и наружные выплески определяют внешним осмотром, рентгеновским просвечиванием.

Дефекты зоны сварки, наружные или внутренние (трещины, раковины, поры) обнаруживают соответственно внешним осмотром, ультразвуковым или рентгеновским методами контроля. Устраняют дуговой сваркой после разделки дефектного участка шва.

Дефекты структуры (охрупчивание, перегрев) как при точечной, так и при стыковой сварке обнаруживают внешним осмотром (по цветам побежалости) или измерением твердости. Эти дефекты в отдельных случаях удается исправить локальной (в электродах машины) или общей термообработкой узла.

При стыковой сварке внутренние дефекты (непровары, посторонние включения, трещины, раковины) обнаруживают внешним осмотром, ультразвуковым, электромагнитным и рентгеновским методами контроля. Однако методы надежного определения непровара отсутствуют. Устраняются дефекты дуговой сваркой.

К дефектам следует отнести также различные отклонения геометрических параметров сварного соединения (глубокие вмятины от электродов, неправильная форма шва, отсутствие соосности свариваемых деталей и др.). Основной причиной их образования следует считать нарушение техники и технологии сварки. Эти дефекты обнаруживают внешним осмотром.

Количество дефектов, допускаемых без исправления и подлежащих исправлению, зависит от ответственности сварного узла и регламентируется соответствующими техническими условиями.

Для предупреждения образования дефектов и их своевременного обнаружения организуют контроль всех звеньев производства сварных узлов, начиная со стадии проектирования сварной конструкции, затем сопутствующих сварке операций, собственно процесса сварки и готовых узлов, а также проводят систематическую паспортизацию оборудования и проверку квалификации наладчиков и сварщиков. В зависимости от способа сварки, организации производства, ответственности конструкций и других особенностей выбирают различные способы контроля и последовательность их выполнения. Методы контроля качества направлены на предупреждение всех указанных выше дефектов в соединениях, а также на выявление возникших дефектов. Однако главным их назначением применительно к условиям контактной сварки является диагностирование и предупреждение непроваров, так как остальные дефекты сравнительно легко обнаруживаются общеизвестными методами дефектоскопии. На рис. 2.25 дан наиболее полный перечень существующих способов контроля шва, выполненных контактной сваркой.

Технологический контроль чертежей – первый и важнейший этап контроля; он способствует созданию технологичной конструкции сварного узла в стадии его проектирования и выполняется наиболее квалифицированными технологами-сварщиками. На этом этапе проверяется правильность выбранного сочетания толщин и марок металла, размещение сварных швов и выбор размеров сварных соединений, возможность свободного подхода к месту сварки, рабочими элементами машины, возможность контроля сварных швов, а также механизации и автоматизации процессов сварки и контроля.

Контроль операций, сопутствующих точечной и шовной сварке, включает проверку размеров входящих деталей и узла после сварки и прихватки, марки металла и его технологического состояния, качества поверхности деталей; качества антикоррозионных покрытий, правильности их размещения и времени нанесения под нахлестку; марки металла электродов, формы их рабочей поверхности и охлаждения, качества сборки; размеров и расположения прихваток, а также базовых размеров сборочных и прихваточных приспособлений.

Во время сборки, прихватки и сварки часто образуются упругие зазоры. Если они больше установленного допуска, можно ожидать дефектов в виде непроваров и выплесков.

На качество деталей и стойкость электродов большое влияние оказывают процессы массопереноса. Их активность при сварке постепенно возрастает и достигает критического значения после сварки определенного числа точек. Установить этот предел визуально не представляется возможным. Накопление продуктов взаимодействия сопровождается соответственно увеличением электрического сопротивления и перепада напряжения в контакте электрод-деталь при сварке от точки к точке. Значение перепада напряжения используют в качестве объективного признака, характеризующего состояние контакта.

При автоматизации цикла сварки повторяемость выбранной программы в значительной мере определяет качество сварки, которое зависит от надежности работы сварочного оборудования. Машины в установленные сроки подвергаются текущему (предупредительному) и капитальному ремонту, а также периодически проходят так называемую аттестацию, которая заключается в проверке паспортных данных и выдаче свидетельства о пригодности машины к эксплуатации.

В паспорт заносят и систематически проверяют основные механические и электрические характеристики оборудования, которые не должны изменяться во времени свыше установленного допуска. Свидетельство о пригодности сварочных машин к эксплуатации выдается на основе всесторонних испытаний технологических образцов. При этом основное внимание уделяется показателям стабильности размеров литой зоны шва и результатов механических испытаний.

На качество сварки оказывает влияние квалификация наладчиков и сварщиков. От навыка наладчиков зависит надежность сварочного оборудования и аппаратуры контроля; от навыка сварщика зависит качество прихватки и сварки узлов. В связи с этим к сварщикам предъявляются определенные квалификационные требования, отнесенные к соответствующему разряду работы, предусмотренному тарифно-квалификационными справочниками. Для оценки квалификации наладчиков и сварщиков периодически проводят их аттестацию – проверку теоретических и практических знаний в объеме специальных программ, включающих вопросы техники безопасности. На основании результатов аттестации специальные аттестационные комиссии выдают наладчикам и сварщикам свидетельство о допуске к самостоятельной работе.

Статистический контроль является способом статистической обработки результатов, полученных другими методами контроля. В условиях контактной сварки этот контроль может быть использован как при операциях промежуточного контроля (для оценки качества работы оборудования, правильности подобранного режима сварки, качества подготовки поверхности), так и при окончательном контроле.

Рис. 2.25. Перечень существующих способов контроля швов контактной сварки

Для суждения о качестве процесса, стабильности результатов сварки показатели качества, обследованные по отобранной пробе, немедленно обрабатывают и предъявляют контролерам и наладчикам. Распространенная и удобная форма записи результатов обработки испытаний проб – точечные графики, вывешиваемые на видном месте на соответствующих позициях контроля. Методы статистического контроля позволяют оценить достоверность контроля, а также установить оптимальный объем выборки для контроля соединений.

Современное производство, как правило, характеризуется большим объемом работ, связанных с контролем. Трудоемкость контроля становится сопоставимой с трудоемкостью процесса изготовления изделий. В связи с этим возникает необходимость резкого увеличения производительности контроля без ущерба для качества соединений. Это достигается путем механизации и автоматизации ручных контрольных операций, создания систем автоматического, пассивного и активного контроля в процессе сварки (сопутствующий контроль) по параметрам, обладающим наибольшей связью с качеством сварки. При пассивом контроле соответствующая аппаратура констатирует лишь качество сварки, не вмешиваясь в процесс сварки. При активном контроле происходит автоматическое корректирование процесса (с целью получения заданного качества сварки) в зависимости от разности между заданным изменением выбранного оценочного параметра и его фактическим сигналом.

Сопутствующий контроль обеспечивает выдачу сигналов оценки качества на наиболее ранней стадии изготовления сварных узлов.

2.8.2. Контроль сварных соединений

Контроль сварных соединений заключается в качественной или количественной оценке основных признаков, характеризующих их работоспособность.

Контроль осуществляют с разрушением и без разрушения соединений.

Контроль с разрушением проводят путем испытания технологических образцов (образцов-свидетелей) и выборочных испы-

таний сварных конструкций. Этот способ контроля дает практически лишь консультативную информацию, информацию по аналогии, так как качество неразрушенных соединений в изделиях остается неизвестным. В то же время простота и наглядность результатов послужили причиной широкого применения контроля с разрушением, особенно технологических образцов в промышленности.

Подбор режима сварки, проверку качества соединения в процессе сварки, а также проверку стабильности работы сварочного оборудования ведут по результатам соответствующих испытаний технологических образцов. Технологические образцы должны соответствовать свариваемым деталям по марке металла, состоянию поверхности, сочетанию толщин или сечению, шагу сварных точек, а в отдельных случаях и по форме узла.

По результатам испытаний технологических образцов (если не требуются данные по другим видам контроля) дается разрешение на сварку или приемку готового изделия, а также заключение о пригодности к эксплуатации сварочного оборудования.

Для определения качества сварных соединений в конструкции иногда практикуется выборочное разрушение определенного количества готовых изделий из партии. Виды испытаний сварных соединений зависят от конфигурации и назначения изделия и определяются специальной программой.

Неразрушающий контроль – наиболее перспективный при дефектоскопии сварных соединений. При контроле без разрушения применяют в первую очередь следующие методы физического контроля: радиационный, электромагнитный и ультразвуковой.

К неразрушающим методам контроля следует отнести также контроль внешним осмотром, контроль на герметичность и сопротивление соединений заданным нагрузкам.

Наиболее простой способ неразрушающего контроля – внешний осмотр соединений невооруженным глазом или с помощью лупы 7–10-кратного увеличения. При осмотре проверяют расположение точек и швов в соответствии с чертежом, форму, размеры вмятин от электродов, наличие наружных дефектов (трещины, выплески, иногда непровары) и продуктов массопереноса, зазоры между деталями и деформацию узла. При стыковой сварке внешним осмотром или обмером выявляют дефекты гео-

метрической формы (перекосы, смещения, укорочения), подгар поверхности, трещины, пережог металла стыка. Иногда внешний осмотр позволяет обнаружить внешние трещины, непровары и структуру шва после удаления высаженного металла и грата, полирования и травления поверхности. В соединениях из легированных сталей измеряют твердость шва. При необходимости швы сварных конструкций проверяют на герметичность: в открытых конструкциях керосино-меловой пробой, в закрытых сосудах – сжатым воздухом в водяной ванне, аммиаком с индикаторной бумагой, гелиевыми или фреоновыми течеискателями и другими известными методами.

К методам неразрушающего контроля следует отнести также испытания соединений нагружением иногда до расчетных или несколько превышающих этот уровень значений. Изделия, выдержавшие эти испытания, считаются годными. Этот метод испытаний нашел широкое применение при изготовлении радиоэлектронных приборов, у которых проверяют электрические и механические параметры. Емкости ответственного назначения кроме испытания на герметичность испытывают на сопротивление расчетным вибрационным и ударным нагрузкам.

В некоторых случаях подобные или близкие к расчетным значениям нагружения составляют неотъемлемую часть технологического процесса производства изделий. Так, например, сваренные стыковой сваркой ободья колес испытывают раздачей их на экспандере, кольцевые заготовки шпангоутов после сварки подвергают правке с растяжкой, соединения из полос проверяют последующей прокаткой до заданной формы. При испытании нагружением целесообразно одновременно контролировать зону сварки, например, методом акустической эмиссии с целью получения информации о появлении недопустимых дефектов.

Радиационный контроль с использованием рентгеновского излучения – один из наиболее распространенных методов неразрушающего контроля соединений при контактной сварке. Этим способом хорошо выявляются несплошности (трещины, раковины, скопление оксидов, поры, выплески и другие подобные дефекты), но в общем случае не выявляются непровары, при которых, как правило, несплошность отсутствует.

Тем не менее, иногда при точечной, шовной и рельефной сварке можно, используя рентгеноконтрастность границы шва, по рентгенограмме определять размеры зоны взаимного расплавления деталей и, таким образом, объективно диагностировать наличие и отсутствие непроваров.

Для выявления несплошностей в соединениях, выполненных стыковой сваркой, иногда наряду с рентгеновским используют и гамма-излучение. Схемы просвечивания выбирают в зависимости от конструкции узла, физических параметров и толщины свариваемых металлов. При сварке толстостенных заготовок, в том числе и трубных, целесообразна схема с установкой источника излучения под некоторым углом к оси шва.

Ультразвуковой контроль основан на способности ультразвуковых колебаний (УЗК) распространяться в металле в виде направленных волн на большие расстояния и отражаться от участка разной плотности, например дефектов, при условии, если их размеры по толщине больше длины ультразвуковой волны. Современные дефектоскопы в основном работают с частотой распространения упругих колебаний в диапазоне частот 0,5–25 МГц и способны четко обнаруживать дефекты размером не менее 10 мкм.

Ультразвуковой контроль позволяет в общем случае определять следующие дефекты соединений, выполненные контактной сваркой: раковины, трещины, поры, выплески, а также локальные скопления оксидов (последний дефект характерен для стыковой сварки оплавлением). Выявление этих дефектов проводится обычными методами ультразвуковой дефектоскопии. Наиболее опасный дефект – непровар вследствие отсутствия при этом несплошностей и малой толщины поверхностных оксидов ультразвуковым методом контроля не выявляется.

Магнитные методы контроля могут быть использованы главным образом при дефектоскопии соединений, выполненных из ферромагнитных материалов стыковой сваркой. Хорошо обнаруживаются поверхностные дефекты или несплошности (раковины, трещины, поры) на глубине не более 10–15 мм. Однако следует учитывать, что магнитный рисунок на поверхности контролируемого изделия может изменяться в зависимости не только от дефектов, но и от локальной структурной или магнитной неоднородности металла, а также от геометрии сварного

шва, что может быть причиной ложной расшифровки получаемого изображения. При точечной сварке сталей в ряде случаев кроме дефектов несплошности удается фиксировать наружные границы пояска.

Электромагнитный метод контроля или метод вихревых токов используют для определения размеров литого ядра при точечной сварке соединений на деталях из стали 08кп, сплавов АМгб, Д16, ОТ4-1. При контроле переменное магнитное поле накладного преобразователя возбуждает в зоне сварки вихревые токи, величина которых зависит от локальной электропроводимости – размеров литого ядра. При отсутствии литого ядра она максимальна и соответствует полному непровару. С увеличением литого ядра до номинального значения она снижается на 12–15 %.

2.8.3. Контроль процесса сварки

В основном заключается в контроле параметров режима сварки с целью обеспечения стабильной работы сварочного оборудования. Задача решается путем создания специальной аппаратуры периодического и непрерывного измерения, а также автоматической стабилизации основных параметров режима сварки.

Сложность организации этого контроля объясняется кратковременностью процесса сварки, большой производительностью работы оборудования, импульсным характером электрических параметров, недоступностью наблюдения за формирующейся зоной соединения и другими факторами.

3. МАШИНЫ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

3.1. Классификация и назначение машин

Можно выделить два больших класса машин: машины общего назначения и специальные.

Машины общего назначения предназначены для сварки деталей широкой номенклатуры. На однотипных машинах можно производить сварку деталей, различных по конструкции, марке и толщине металла. В таких машинах стараются расширить диапазоны свариваемых толщин более глубоким регулированием усилия сжатия, сварочного тока, совершенствованием динамических характеристик механизма сжатия, стабилизацией параметров режима.

Специальные машины предназначены, как правило, для сварки определенных узлов, конкретных изделий. Например: машины для сварки арматуры железобетонных конструкций, цепесварочные машины, многоэлектродные машины для сварки правой боковой стенки бункера комбайна, полуавтоматы для рельефной сварки корпусов полупроводниковых приборов и т. д. В общем объеме производства контактных машин доля специальных машин постоянно повышается и в стоимостном выражении в настоящее время составляет 70%. Эта тенденция, очевидно, сохранится и в будущем, поскольку специальные машины являются значительно более высокопроизводительными.

Тем не менее, роль машин общего назначения весьма высока. Их выпуск в количественном отношении более чем на порядок превышает выпуск специальных машин [3, 5, 13].

Несмотря на большое многообразие типов, конструктивного оформления, мощности и назначения, ГОСТ 297-80 «Машины контактные. Общие технические условия» дает следующую классификацию машин общего назначения:

- по виду получаемых при сварке соединений – точечные, шовные, рельефные, стыковые;
- по конструктивному исполнению – стационарные радиального типа, стационарные прессового типа, подвесные со встроенным трансформатором, подвесные с отдельным трансформатором;

- по типу источника сварочного тока – переменного тока, низкочастотные, постоянного тока (с выпрямленным током во вторичной цепи), конденсаторные;
- по типу усилия сжатия – с постоянным усилием, с переменным усилием;
- по нормируемым техническим требованиям – группа А (с повышенной стабильностью параметров), группа Б (с нормальной стабильностью параметров).

По условиям производства к целому ряду сварных конструкций предъявляются повышенные требования по стабильности качества сварных соединений. Эти требования можно выполнить на контактных машинах, основные параметры которых имеют меньший диапазон колебаний, зависящих от допустимых колебаний напряжения питающей электрической сети, давления воздуха в пневмосети, допустимого колебания температуры окружающего воздуха, от загрузки машины и других условий. В ГОСТ 297-80 конкретно указаны все технические требования, которым должны отвечать машины групп А и Б. Машины группы А имеют более стабильные параметры, которые достигаются усложнением машин этой группы по сравнению с машинами группы Б.

Для машин общего назначения ГОСТ 297-80 дает условное обозначение, соответствующее структуре, приведенной на рис. 3.1.

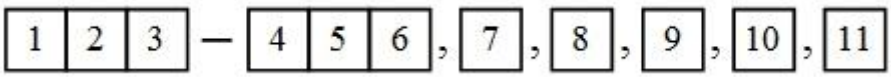


Рис. 3.1. Структура условного обозначения машины для контактной сварки общего назначения

1 - обозначение вида изделия (М – машина контактная);

2 - обозначение машины по виду соединений, получаемых при сварке (Т – точечная, Ш – шовная, Р – рельефная, С – стыковая);

3 - обозначение машины по конструктивному исполнению и (или) типу источника тока (В – с выпрямлением тока во вторичном контуре, К – конденсаторная, Н – низкочастотная, Р – радиальная, П – подвесная, С – для стыковой сварки сопротивлением, О – для стыковой сварки оплавлением);

4 - наибольший вторичный ток в килоамперах (в обозначениях точечных, шовных и рельефных машин) или усилие осад-

ки в десятках килоньютонов (в обозначениях стыковых машин для сварки оплавлением);

5 - номер модификации машины;

6 - вид климатического исполнения по ГОСТ 15150-69;

7 - обозначение группы машины в зависимости от нормируемых технических требований;

8 - напряжение питающей сети;

9 - частота питающей сети;

10 - слово «экспорт» (указывается для машин, предназначенных на экспорт);

11 - обозначение технических условий на конкретную машину, а для машин для экспорта, обозначение стандарта.

Например, подвесная точечная машина с выпрямлением тока во вторичном контуре, на наибольший вторичный ток 12 кА, с номером модификации 05, климатического исполнения Т4, группы А, на напряжение питающей сети 380В частотой 50 Гц имеет следующее условное обозначение:

Машина МТПВ-1205 Т4, А, 380 В, 50 Гц, экспорт, ГОСТ 297-80.

Классификация специальных машин отличается от классификации машин общего назначения. Наиболее показательным для специальной машины является указание того изделия, для сварки которого она предназначена. Другой существенной отличительной чертой специальной машины является степень механизации и автоматизации операций по загрузке, перемещению и выгрузке свариваемых изделий. В комплексах и в сборочно-сварочных линиях могут быть также применены и предварительные операции по подготовке деталей [3, 5, 13].

Специальные машины, таким образом, могут быть классифицированы следующим образом:

- по виду свариваемых изделий – многоэлектродные для сварки арматуры железобетонных конструкций, для сварки сеток, цепесварочные, многоэлектродные для сварки листовых конструкций, шовные для сварки топливных баков, рельефные для герметизации корпусов полупроводниковых приборов и т. д.;
- по степени механизации и автоматизации – машины, полуавтоматы, автоматы, комплексы, сборочно-сварочные линии, в том числе линии, оснащенные роботами.

3.2. Основные характеристики контактных машин

Совокупность основных параметров контактной машины является ее основной характеристикой.

Для машин общего назначения ГОСТ 297-80 устанавливает следующие основные параметры.

Наибольший вторичный ток. Это ток, который проходит во вторичном (сварочном) контуре при его коротком замыкании на максимальной ступени регулирования при номинальных значениях раствора и вылета сварочного контура. Вторичный контур включает в себя все токоведущие части, по которым протекает сварочный ток, в том числе и вторичную обмотку сварочного трансформатора.

В предыдущем ГОСТ 297-73 одним из основных параметров был номинальный сварочный ток. Однако, несмотря на некоторые удобства для потребителей машин, этот параметр весьма трудно было сделать определенным. При испытаниях машин необходимо было между электродами устанавливать эталонные сопротивления, равные по значению сопротивлениям заданных свариваемых металлов, определенных толщин. Здесь имелись значительные расхождения в оценке сопротивлений, связанные, очевидно, с тем, что экспериментальные данные охватывают определенный диапазон и в процессе сварки сопротивление образцов непостоянно. Кроме того, учитывая, что сварка металлов может осуществляться в определенном диапазоне «мягких» – «жестких» режимов, установить для всех случаев какой-то определенный номинальный режим и соответственно номинальный сварочный ток практически невозможно. Проблематично также создание эталонных сопротивлений, узаконенных метрологическими службами. Все это заставило перейти при классификации машин от номинального сварочного тока к наибольшему вторичному току [3, 5, 13].

При этом наименование ряда машин было изменено, хотя сами машины остались неизменными. Так, например, машины МТ-1222, МТ-1618, МТ-3201 стали обозначаться сейчас соответственно МТ-2202, МТ-1818, МТ-4019.

Несложно определить ориентировочно сварочный ток, который можно получить на данной машине при сварке тех или иных деталей, если известны активное и индуктивное сопротив-

ления машины, вторичное напряжение сварочного трансформатора, которые следует приводить в паспортных данных машины, и ориентировочное сопротивление деталей.

Номинальный длительный вторичный ток $I_{2д.ном}$. В соответствии с ГОСТ 22990-78 «Машины контактные. Термины и определения» номинальное значение любого параметра, в том числе и рассматриваемого, является расчетным для машины и исходным для определения отклонений от этого значения при испытаниях и эксплуатации контактной машины.

Длительный вторичный ток – это условный ток, который при непрерывном его прохождении по вторичному контуру нагревает его части до той же температуры, что и реальный ток в повторно-кратковременном режиме.

Действующий длительный вторичный ток $I_{2д}$ определяется соотношением

$$I_{2\partial} = 0{,}1 I_2 \sqrt{ПВ},,$$

где ПВ – $(t_и/t_ц)100$ – продолжительность включения, %; I_2 – действующий реальный вторичный ток со временем включения $t_и$ и течение сварочного цикла $t_ц$.

Номинальное и (или) наименьшее и наибольшее усилия сжатия электродов соответственно $F_{эл.ном}$, $F_{эл.min}$, $F_{эл.max}$ – для точечных, шовных и рельефных машин.

Номинальный и (или) наименьший и наибольший вылет соответственно $L_{ном}$, L_{min}, L_{max} – для точечных, шовных и рельефных машин. Для точечных и шовных машин вылет – это расстояние от осевой линии электродов до передней стенки машины. Для рельефных машин вылет отсчитывается от середины плиты.

Номинальный и (или) наименьший и наибольший раствор – для точечных, шовных и рельефных машин. Раствор машины – это наименьшее расстояние между консолями или их выступающими частями, определяемое на всей длине вылета машины.

Наибольшее ковочное усилие – для машин с переменным усилием сжатия.

Наибольшая длительность прохождения сварочного тока – для точечных, шовных и рельефных машин переменного тока, постоянного тока и низкочастотных.

Наибольшее вертикальное смещение электродов – для точечных и шовных машин.

Наибольшее взаимное смещение электродов – для точечных и шовных машин: Вертикальное и взаимное (верхнего электрода относительно нижнего в горизонтальной плоскости) смещения электродов не должны превышать наибольших значении при безударном сжатии номинальным усилием без включения тока.

Допуск параллельности **контактных поверхностей плит** – для рельефных машин.

Наименьшая и наибольшая линейные скорости роликовых электродов – для шовных машин.

Номинальное и (или) наименьшее и наибольшее усилии осадки – для стыковых машин.

Масса.

Основная характеристика машины общего назначения дает возможность определить ее *технологические возможности*. Сопоставляя режимы сварки с параметрами, входящими в основную характеристику машины, можно установить возможность сварки на данной машине тех или иных конкретных деталей. Основная характеристика дает представление о техническом совершенстве машины, ее техническом уровне.

Для специальных машин основная характеристика включает в себя параметры, которые характеризуют технологические возможности машины по сварке тех изделий, для которых она предназначена, производительность, потребляемую из сети электрическую мощность, габаритные размеры. Например, основными параметрами машины для сварки плоских арматурных сеток являются ширина свариваемой сетки, диапазон диаметров поперечной и продольной проволок, регулируемое число продольных проволок, регулируемый шаг поперечных проволок, производительность в метрах в минуту или число свариваемых поперечных проволок в минуту, номинальная мощность, габаритные размеры машины, ее масса [3, 5, 13].

3.3. Общая характеристика контактных машин

3.3.1. Машины точечной сварки

Контактные точечные машины общего назначения по практическому использованию являются наиболее массовым видом контактного сварочного оборудования. Наибольшее распространение получили однофазные машины переменного тока типа МТ.

Машина точечной сварки (рис. 3.2) имеет привод сжатия *3* деталей, сварочный трансформатор *13*, контактор *11*, реле циклов *2*. Все эти устройства смонтированы в корпусе *1* машины. Сварочный ток от трансформатора *13* подводится к месту сварки через вторичный контур машины, состоящий из гибких шин *10*, консолей *4*, электрододержателей *5* и электродов *7*.

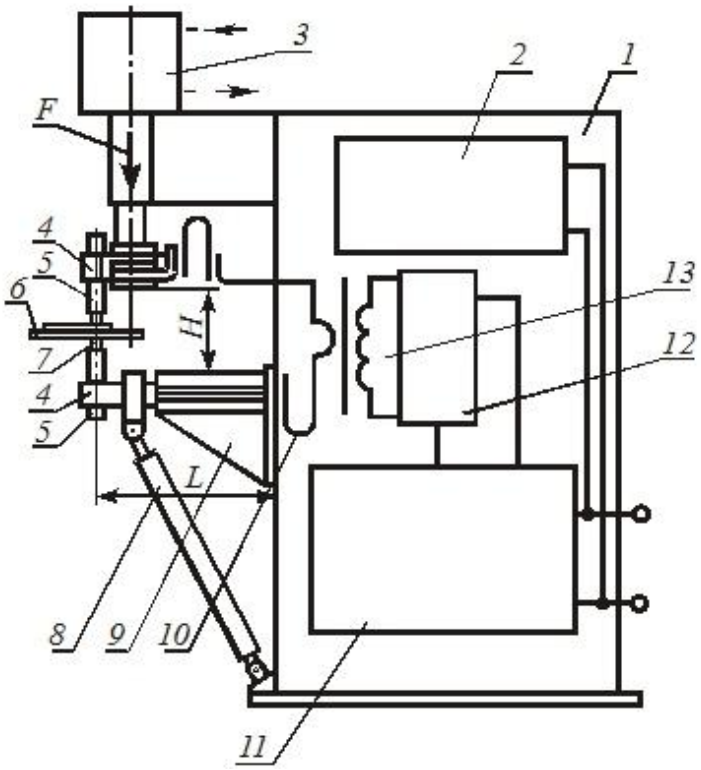


Рис. 3.2. Схема точечной машины:
1 – корпус; *2* – реле цикла сварки; *3* – привод сжатия; *4* – консоли; *5* – электрододержатели; *6* – свариваемая деталь; *7* – электроды; *8* – подкос; *9* – нижний кронштейн; *10* – гибкие шины; *11* – контактор; *12* – переключатель ступеней; *13* – сварочный трансформатор; *L* – вылет электродов; *H* – раствор межу консолями; *F* – сжимающее усилие на электродах

Наибольшее распространение находят точечные машины прессового типа с двусторонним подводом тока, в которых электроды перемещаются прямолинейно и вертикально (рис. 3.2.).

В радиальных машинах электрод закреплен на качающемся токоподводе с приводом, расположенном внутри корпуса машины. При этом пространство над верхним электродом сваободно от частей машины и молжет быть использовано для размещения свариваемых изделий сложной конфигурации.

По своей конструкции радиальные машины просты, экономичны в изготовленнии, менее металлоемки. Их масса на 25–30 % меньше массы аналогичных машин прессового типа. Промышленностью серийно выпускают машины МТР-1201 (прототип МТ-604), МТР-1701 (прототип МТ-810), МТР-2401 (прототип МТ-1614).

Точечные машины средней и большой мощности обладают большой массой (1–16 т), поэтому их устанавливают стационарно, а детали в процессе сварки перемещяют. При сварке громоздких и тяжелых деталей, крупногабаритных изделий в труднодоступных местах, а также сварки пространственных конструкций перемещают машину, применяют различные клещи, пистолеты. Машины подвешиваются на специальных балансирных коромысловых уравновешивающих устройствах, обеспечивающих необходимую маневренность сварочным клещам. Машины МТП-1110, МТП-1111, МТП-1409 имеют отдельно расположенные сварочный трансформатор и сварочные клещи различной конструкции. Машины МТП-2401 (К-243В) и МТП-1210 (К-264) выпускаются с трансформаторами, встроенными в сварочные клещи [3, 5, 13].

Однофазные машины переменного тока (МТ, МТП, МТР) наиболее приспособлены для сварки сталей и титановых сплавов. Из-за высоких скоростей нарастания тока сварка высокопрочных и жаропрочных сплавов (особенно толщиной менее 0,8 мм) сопровождается выплесками и нестабильным размером ядра. Сварка на таких машинах легких сплавов слишком энергоемка и сопровождается интенсивным загрязнением поверхности деталей, электродов. Пологая нагрузочная характеристика ограничивает саморегулирование процесса.

Машины постоянного тока (МТВ, МТВР) и низкочастотные (МТН-7501) имеют большие возможности саморегулирования, благоприятную форму импульса тока и сравнительно малую энергоемкость. Поэтому их рекомендуют для сварки ответственных изделий из любых свариваемых металлов.

Предприятиями разработано и выпускается пять типоразмеров машин постоянного тока для точечной сварки с наибольшими токами 35–105 кА. Кроме того, выпущено небольшое число мощных машин со сварочным током 160 кА и подвесных клещей с источниками постоянного тока: МТВ-4801, МТВ-4802, МТВР-4801, МТВ-8002, МТВ-16002, МТВП-802, МТПВ-1207.

Конденсаторные машины (ТКМ-15, ТКМ-17, МТК-2001, МТК-5502, МТК-8501) отличаются наименьшей энергоемкостью. Однако жесткий и относительно мало изменяющийся по форме импульс тока ограничивает толщину свариваемых высоколегированных сталей и жаропрочных сплавов (до 0,8 мм). Большинство легких сплавов, напротив, свариваются успешно. Наиболее целесообразны конденсаторные машины для сварки деталей небольшой и неравной толщины из относительно пластичных металлов.

Одним из видов широко распространенного специального оборудования для точечной сварки являются многоэлектродные машины (МТМ) [3, 5, 13].

3.3.2. Машины рельефной сварки

Машины отличаются от точечных повышенной электрической мощностью, меньшим полезным вылетом электродов (электродных или контактных плит), большей жесткостью силовых элементов, улучшенными динамическими характеристиками механизма сжатия Они предназначены для рельефной сварки деталей главным образом из сталей и титановых сплавов с различной формой рельефов. При соответствующей жесткости режимов и достаточном сварочном токе возможна сварка деталей из легких сплавов. Верхняя и нижняя контактные плиты имеют Т-образные пазы для крепления приспособлений и электродов. В некоторых машинах (например, МР-3818) наряду с контактными плитами имеются и электрододержатели с электродами для точечной сварки (некоторые мощные машины точечной сварки снабжены небольшими

контактными плитами для рельефной сварки). Все универсальные машины рельефной сварки выполнены стационарными прессового типа с вертикальным ходом верхней головки, пневматическим поршневым приводом сжатия и дополнительного хода.

Наибольшее распространение получили однофазные машины переменного тока типа МР. Обращают внимание необычно большие для машин переменного тока значения номинального тока (до 100 кА) и потребляемой мощности (до 820 кВА), а также повышенные усилия сжатия (до 8000 даН). Такие характеристики необходимы для многоточечной рельефной сварки с применением протяженных рельефов [3, 5, 13].

Машины типа МР-3818 и МР-6918 имеют схожую компоновку. Они обладают сравнительно жестким корпусом классической формы с усиленным нижним кронштейном. Машина МР-6303 является базовой для машин большой мощности (МР-8001, МР-10002) и имеет корпус в виде особо жесткой скобы без проема в передней стенке. В машинах этой серии двухтрансформаторная схема коммутации, уменьшающая индуктивные потери и увеличивающая мощность. Два трансформатора расположены сбоку корпуса.

Машины с выпрямлением тока во вторичном контуре типа МРВ существенно расширяют возможности рельефной сварки, увеличивают диапазон толщины деталей и производительность процесса, создают определенные энергетические преимущества. Однако их стоимость выше, чем однофазных, в основном из-за высокой цены кремниевых вентилей.

Машина МРВ-6301 предназначена для рельефной сварки различных втулок, штуцеров, бобышек, крепежных деталей и т. п. к крупногабаритным деталям из разнообразных сплавов. Однако большой вылет и наличие гнезда для крепления электродов в контактной плите позволяют эффективно использовать эту машину и для точечной сварки деталей из легких сплавов, сталей, титановых сплавов.

3.3.3. Машины шовной сварки

Машины для шовной сварки различаются по роду сварочного тока, по характеру установки, по расположению роликов, по

способу передачи крутящего момента на сварочные ролики, по способу подвода сварочного тока к свариваемому изделию, по назначению, по виду сварки, по виду сварочного цикла, по характеру движения свариваемых деталей в процессе сварки [3, 5, 13].

По роду сварочного тока: машины переменного тока; машины постоянного тока с выпрямлением во вторичном контуре; низкочастотные машины; конденсаторные машины.

По характеру установки: стационарные машины; подвесные машины.

По расположению роликов: машины для поперечной сварки; машины для продольной сварки; универсальные машины, в которых предусмотрена возможность переналадки с поперечной сварки на продольную и обратно.

По способу передачи крутящего момента на сварочные ролики: машины с осевым приводом одного или обоих роликов; машины с радиальным приводом обоих роликов с помощью шарошек; машины, в которых ролики вращаются за счет трения о движущееся изделие; машины, в которых ролики вращаются за счет трения о неподвижное изделие при поступательном перемещении каретки.

По способу подвода сварочного тока к свариваемому изделию: машины с односторонним токоподводом; машины с двусторонним токоподводом.

По назначению: машины общего назначения; специальные.

По виду сварки: для непрерывной сварки; для прерывистой сварки. По виду сварочного цикла: полуавтоматические; автоматические.

По характеру движения свариваемых деталей в процессе сварки: с непрерывным движением; с прерывистым движением.

По компоновке и конструкции большинства узлов шовные машины схожи с точечными. Основным отличием является то, что сварочные электроды у них выполнены в виде вращающихся роликов, в связи с чем машины снабжены приводом вращения и кинематическими узлами, осуществляющими повышение крутящего момента привода с одновременным понижением частоты вращения и передачу его к сварочным роликам. Сварочные ролики устанавливаются в специальных электродных устройствах, с помощью которых осуществляется передача на ролики сварочно-

го тока и сварочного усилия. В ряде машин применяются устройства для зачистки и профилирования сварочных роликов.

Среди шовных машин наибольшее распространение получили однофазные машины переменного тока типа МШ и с выпрямлением тока во вторичном контуре типа МШВ. В микросварке используют небольшие конденсаторные машины. Однофазные машины переменного тока с мощностью до 323 кВА предназначены главным образом для шовной сварки деталей из сталей, титановых сплавов.

Машина МШВ-1201 предназначена для шовной сварки деталей малой и неравной толщины из сталей, титановых сплавов типа сильфонов, мембранных коробок. На нижней консоли могут укрепляться сборочно-сварочные приспособления типа цанг, оправок. Машина МШВ-1601 с жестким корпусом рассчитана на шовную сварку крупногабаритных узлов из сталей, титановых сплавов. На машине МШВ-4002 благодаря значительной силе тока и усилию сжатия можно сваривать и детали из алюминиевых сплавов. Несколько упрощенный пневмопривод обеспечивает лишь циклограмму с постоянным усилием [3, 5, 13].

Машина МШВ-7501 (МШВ-6301-2) имеет наиболее широкие технические возможности и предназначена для сварки самых разнообразных металлов при больших размерах деталей. Машина МШВ-8001 предназначена главным образом для шовной сварки алюминиевых и магниевых сплавов.

Машина МШВ-12001 наиболее мощная в этой серии и позволяет соединять детали из различных сплавов большой толщины и размеров. Она отличается наибольшей жесткостью сварного корпуса, наивысшими токами и усилиями. Внутри корпуса находятся два сварочных трансформатора, а выпрямительные блоки расположены сбоку, охватывая переднюю стенку с обеих сторон.

3.3.4. Машины стыковой сварки

Устройство стыковых машин, принцип их действия в значительной степени определяются видом сварки, для которого предназначается конкретная стыковая машина. Поэтому в основу классификации контактных стыковых машин положены виды (методы) сварки, реализуемые на них: сварка оплавлением, свар-

ка сопротивлением. По характеру действия механизмов машины и степени автоматизации можно выделить следующие группы машин: машины с автоматизированным процессом сварки; машины с применением ручного управления процессом сварки; машины-автоматы, в которых автоматизированы не только процесс сварки и операции механизмов, но и установка свариваемых деталей в сварочную машину и снятие сваренных деталей; машины-установки (машины-комплексы), в которых выполняется не только сварка, но и другие вспомогательные операции – механическая обработка торцевых поверхностей перед сваркой, срезка грата, гибка заготовок перед сваркой и калибровка после сварки; машины – гибкие производственные модули (ГПМ), предназначенные для работы в составе гибких производственных систем; наряду с полной автоматизацией основных и вспомогательных операций особенностью машин – ГПМ является автоматическая или автоматизированная переналадка режимов работы для сварки группы изделий [3, 5, 13].

Конфигурация свариваемых деталей в большой степени влияет на конструкцию механизмов специальных машин, на кинематическую схему этих машин и их отдельных механизмов; поэтому специальные стыковые машины классифицируются также по конфигурации деталей, для сварки которых они предназначены.

Основные узлы стыковых машин делятся на следующие группы: узлы, образующие в совокупности основную силовую механическую часть, воспринимающие усилие осадки; механизмы подачи подвижного зажима; механизмы для выполнения вспомогательных операций; узлы силовой электрической части; узлы управления процессом сварки и механизмами машины.

В машинах стыковой сварки (рис. 3.3) на станине *1* установлены неподвижная *4* и подвижная *8* плиты с размещенными на них устройствами *6* и *7* для зажатия свариваемых деталей. Подвижная плита перемещается по направляющим *10* с помощью механизма подачи *9*. Вторичный виток сварочного трансформатора *2* через токоподводы *3* и губки *5* зажимных устройств подключен к свариваемым деталям.

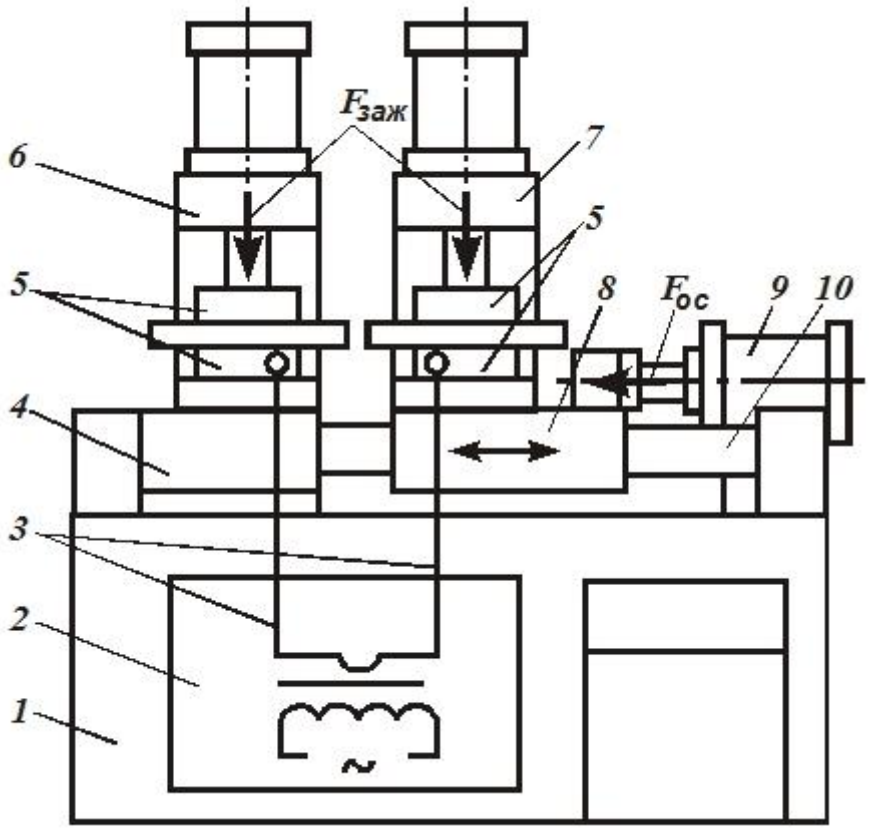


Рис. 3.3. Машина стыковой сварки

Машины МСС-1601, МСС-2502 имеют повышенную точность задания усилия осадки, автоматическую компенсацию воздействия электромагнитных сил сварочного контура на движение подвижного зажима и предназначены для сварки сопротивлением проволоки из стали, меди и алюминия с расплавлением металла в стыке.

Машины МСР-25, МСР-50, МСР-75, МСР-100 и машины более поздних выпусков: МС-801-2, МС-1202, МС-1602, МСО-0802 предназначены преимущественно для сварки непрерывным оплавлением и оплавлением с подогревом, но могут быть использованы также для сварки сопротивлением. Машины МСР-25, МС-804-2 и МСО-0802 наряду с рычажным имеют пружинный механизм подачи, облегчающий выполнение сварки сопротивлением.

Для автоматической сварки оплавлением деталей среднего сечения применяют машины СМ-50, МСМУ-150, МС-1604, МСО-0801, МСО-301, МСО-602 и др.

Машины МСО-0801, МСО-301, МСО-602 имеют быстродействующие пневматические механизмы зажатия, осадки и кулачковый механизм подачи с электродвигательным приводом при

оплавлении. В нем применен электродвигатель постоянного тока с регулированием тока в цепи якоря, что позволяет изменять скорость оплавления в широком диапазоне. Машина МСО-0801 производит сварку только непрерывным оплавлением, а МСО-301 и МСО-602 – непрерывным оплавлением и оплавлением с подогревом. Благодаря программированию суммарной длительности и отдельного цикла подогрева и высокой частоте отдельных циклов (до 3 Гц) обеспечивается повышенная стабильность зоны нагрева.

Для сварки оплавлением с подогревом деталей большого сечения применяют машины МСГА-300, МСГА-500, РСКМ-320У и др. Машины МСГА-300 и МСГА-500 имеют гидравлический с дросселем механизм подачи и пневмогидравлические зажимные механизмы.

Машина РСКМ-320У имеет винтовые механизмы подачи и зажатия с электродвигательным приводом. При подогреве и оплавлении зажим перемещается электродвигателем мощностью 1,7 кВА. Для быстрого перемещения подвижного зажима при осадке используется электродвигатель мощностью 17 кВА. На машине сваривают изделия из низкоуглеродистой стали сечением до 8500 мм^2.

Для сварки деталей больших сечений методом непрерывного оплавления применяют машины с программным регулированием напряжения при оплавлении. Эти машины имеют значительно более высокие технические показатели по сравнению с машинами, предназначенными для сварки оплавлением с подогревом.

В последние годы в ИЭС им. Е. О. Патона разработана серия высокопроизводительных машин для сварки импульсным оплавлением с усилием осадки 160-3000 кН. В эту серию входит универсальная машина К-617, предназначенная для сварки кольцевых и прямолинейных деталей из низкоуглеродистой стали сечением до 4000 мм^2, жаропрочных сплавов сечением до 1200 мм^2 и алюминиевых сплавов сечением до 1000 мм^2.

Для сварки полос и листов применяют специальные машины МОП-50, МСЛ-200-2, МСЛ-500-2, Л-500, 1700А, 2500 и др.

В машине Л-500, предназначенной для сварки полос шириной 50–500 мм и толщиной 1–6 мм, предусмотрен автоматизированный способ точной и быстрой установки полос и обрезки их концов [3, 5, 13].

Машина 1700А предназначена для сварки полос и листов из низкоуглеродистой стали толщиной 2–4,5 мм и шириной 500–1550 мм. Машина имеет гидравлический механизм подачи со следящим золотниковым устройством. Для равномерного зажатия полос служат зажимы, имеющие по три гидравлических цилиндра. В машине установлены три сварочных трансформатора мощностью по 500 кВА. Машина снабжена отдельно стоящим гратоснимателем.

Ряд машин предназначен для сварки труб котельных агрегатов. Это машины ЦСТ-200, МС-2001, МСТ-200 и др. Машина ЦСТ-200 предназначена для сварки непрерывным оплавлением и оплавлением с подогревом труб из перлитных и аустенитных сталей сечением до 900 мм^2. В машине использован кулачковый механизм подачи при оплавлении и пневматический при осадке. Скорость оплавления регулируется изменением профиля кулачка и частоты вращения двигателя постоянного тока. Машина снабжена пневматическими зажимными механизмами с вертикальным разъемом, обеспечивающим сварку змеевиков с малым радиусом гиба.

Машину МС-2001 с номинальной мощностью 150 кВА используют для сварки труб из перлитных и аустенитных сталей диаметром 25–42 мм с толщиной стенок 2,5–5 мм. Машина имеет рычажные пневматические зажимные механизмы с разъемом в горизонтальной плоскости и кулачковый механизм подачи.

Для сварки рельсов в стационарных условиях применяют машины МСГР-500 и К190П. Машина МСГР-500 служит для сварки оплавлением с подогревом. Машина имеет гидравлический механизм подачи, пневмогидравлические зажимные механизмы и трехфазный преобразователь частоты (частота тока 7–12 Гц). При номинальной мощности 500 кВА на машине можно сваривать рельсы сечением до 10000 мм^2. На универсальной машине К.190П рельсы сваривают непрерывным оплавлением с программным регулированием напряжения. Машина К190П имеет значительно меньшую массу и потребляет в 3–4 раза меньшую мощность [3, 5, 13].

Передвижные машины К155, К.255Л, К355 и К555 применяют для соединения рельсов непосредственно в пути. В машинах К155 и К255Л происходит сварка непрерывным оплавлением со ступенчатым регулированием напряжения по программе. Ма-

шины К355 и К555 предназначены для сварки рельсов импульсным оплавлением (частота колебаний 5 Гц). На машине К555 сваривают рельсы сечением до 10000 мм^2. Машины оборудованы гидравлическим механизмом подачи со следящим золотником, позволяющим независимо от массы свариваемых рельсовых плетей (10–20 м) с высокой точностью воспроизводить заданный закон изменения скорости оплавления.

Машины К354, К393 и К375, предназначенные для сварки изделий из легких сплавов, имеют гидравлический механизм подачи со следящим золотником, позволяющий изменять скорость оплавления от 0,3 до 30 мм/с и обеспечивающий скорость осадки до 30 мм/с. Машины оборудованы зажимными губками специальной конструкции с термоизолированными вкладышами, а также устройствами для автоматического контроля нагрева сопротивлением вылетов деталей. Машина К354 номинальной мощностью 4000 кВА позволяет сваривать профили из алюминиевых сплавов сечением до 20000 мм^2. Усилия осадки и зажатия соответственно равны 3000 и 6000 кН.

Машины МСГК-150, МСГК-500 и другие используют для сварки оплавлением с подогревом кольцевых заготовок из сталей и жаропрочных сплавов. Для сварки кольцевых заготовок импульсным оплавлением предназначены машины К616, К607, К566 и др.

Для сварки труб в полевых условиях при изготовлении магистральных и промысловых трубопроводов применяют трубосварочные контактные установки полустационарные (ТКУС) и передвижные (ТКУП). Главные элементы установок – сварочные головки – имеют гидравлический механизм подачи со следящим золотниковым устройством и гидравлические механизмы центрирования и зажатия труб. Трубы диаметром 114–529 мм сваривают с использованием наружных сварочных головок СГ-1, СГ-2 и СГ-3, в которых механизм центрирования и зажатия, механизм подачи и сварочный трансформатор расположены снаружи труб. В двухагрегатных сварочных головках СГ-4 и СГ-5, предназначенных для сварки труб диаметром 720–1020 мм, сварочный трансформатор с токоподводящим устройством расположен снаружи трубы, а все остальные элементы – внутри трубы.

Для сварки труб диаметром 1420 мм с толщиной стенки 16,5–20 мм используют комплекс «Север-1», содержащий сварочную машину К700. Машина К700 располагается полностью внутри свариваемых труб. Концы свариваемых труб изнутри разжимаются цанговыми зажимами с усилием до 12000 кН. При разжатии одновременно происходит центрирование труб. Контурный сварочный трансформатор встроен в зажим. Кратковременная мощность машины 1000 кВА, усилие осадки 4000 кН, производительность 6–8 стыков в час. Сопротивление короткого замыкания кольцевого трансформатора находится в пределах 5–12 мкОм [3, 5, 13].

Имеется также ряд машин, предназначенных для сварки других изделий: звеньев цепей, ободьев автомобильных колес, фланцев, заготовок клапанов и т.д.

3.4. Механическая часть контактных машин

Машины контактной сварки изготавливают по техническим требованиям, изложенным в ГОСТ 297-80 «Машины контактные. Общие технические условия».

Конструктивно машины состоят из двух взаимосвязанных частей – механической и электрической.

Механическая часть – это комплекс конструктивных элементов, создающих жесткость и прочность машины, воспринимающих усилия (корпус или станина, плиты, кронштейны, домкрат, упоры, консоли, электрододержатели, электроды), и механизмов, предназначенных для закрепления, сжатия и перемещения свариваемых деталей. Некоторые конструктивные элементы и узлы механизмов проводят сварочный ток.

Электрическая часть обычно состоит из источника питания, преобразующего энергию сети промышленной частоты для получения сварочного тока (сварочного трансформатора, выпрямителей, иногда батареи конденсаторов и др.) контура для непосредственной передачи тока к деталям (гибких и жестких токоведущих шин, консолей, электрододержателей, электродов, роликов, губок) [3, 5, 13].

Управление и регулирование основных механических (усилие сжатия деталей, скорость вращения роликов, перемещение

деталей и т.д.) и электрических (сварочный ток, вторичное напряжение, мощность) параметров машины осуществляются *аппаратурой управления* через соответствующие блоки.

Кроме жесткости, прочности и эксплуатационной надежности к механической и электрической частям предъявляют следующие требования: быстрота срабатывания и малая инерционность элементов машин, необходимые из-за малой продолжительности сварочного цикла; интенсивное охлаждение нагревающихся элементов; безопасность работы; маневренность элементов сварочного контура, позволяющая использовать машину для сварки изделий различной формы без сложной переналадки; надежная защита трущихся и контактных поверхностей от попадания воды, брызг расплавленного металла, пыли.

3.4.1. Корпуса и станины

Корпус машин прессового типа точечной, рельефной, шовной сварки состоит из силовых элементов: стенок корпуса *2*, верхнего *1* и нижнего *6* кронштейнов (рис. 3.4, *а*). Они воспринимают значительный изгибающий момент от усилия сжатия деталей и обеспечивают необходимую жесткость всей машины. Для удобства изготовления, монтажа элементов корпуса, а также возможности регулирования раствора консолей *h* нижний кронштейн обычно соединяют с передней стенкой болтами. В отдельных случаях оба кронштейна и стенки изготовляют в виде единой сварной или литой конструкции (жесткой скобы). Сварочный трансформатор, элементы механизма вращения и другие системы часто располагают в каркасе *3* за корпусом, реже сбоку стенок корпуса. При боковом расположении трансформатора или выпрямительных блоков переднюю стенку корпуса делают без проема, что дополнительно повышает жесткость. Силовую часть и каркас крепят на подставке *4*. В некоторых случаях для разгрузки нижней токоведущей консоли и кронштейна устанавливают домкрат *5*.

Корпуса (станины) машин стыковой сварки чрезвычайно разнообразны и во многом зависят от конструкции и сечения деталей. Корпус состоит из следующих силовых элементов: стола *1*, неподвижного *2* и подвижного *3* зажимов (рис. 3.4, б). Сварочный трансформатор и другая распределительная аппаратура обычно

монтируются внутри стола *7*. Усилие осадки F_{oc} действует, как правило, в горизонтальном направлении. Для правильного положения деталей до конца сварки силовая часть должна обладать достаточной жесткостью. В противном случае возможны перекосы деталей и дефекты. Жесткость стола существенно увеличивают за счет размещения штанг *4*. Для разгрузки неподвижного зажима, если это возможно, применяют жесткие упоры [3, 5, 13].

Элементы корпусов изготовляют из ферромагнитных сплавов (чугуна, стали), поэтому стремятся расположить элементы как можно дальше от проводников тока. Одну из консолей или зажимов машин электрически изолируют от корпуса гетинаксовыми или текстолитовыми прокладками и втулками.

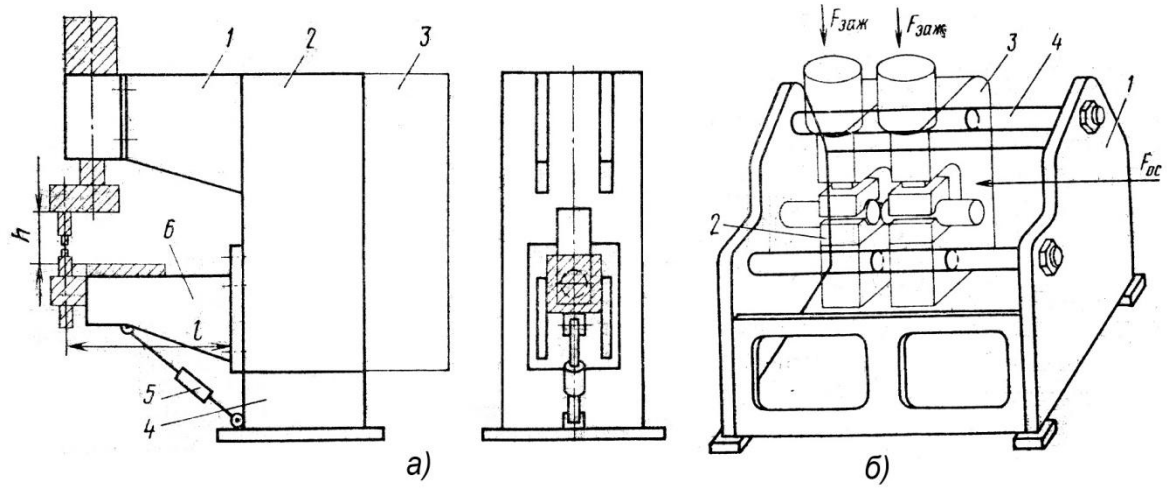


Рис. 3.4. Корпус контактных машин:
а – точечной, рельефной и шовной сварки прессового типа; *б* – стыковой сварки

3.4.2. Сварочный контур

Сварочный контур – это система токоведущих элементов и электрических контактов, обеспечивающих подвод электрического тока от вторичного витка трансформатора к свариваемым деталям.

В машинах точечной сварки контур состоит из консолей, электрододержателей, гибких и жестких шин, электродов, а также, ряда других элементов. Размеры и конструкция элементов сварочного контура зависят от типа машины, сварочного тока и усилия сжатия, рабочего пространства *l* и *h* (см. рис. 3.2). Чем

дальше расположен трансформатор от электродов, тем больше вылет *l* и тем больше размеры деталей, которые могут быть сварены на данной машине без кантования. Однако увеличение вылета *l* и раствора *h* вызывает рост сопротивления вторичного контура и мощности, потребляемой из сети. Поэтому *l* вполне определенна для каждой машины и должна соответствовать стандарту или техническому условию на машины, например, 300, 500, 800, 1200, 1500, 1700 мм [3, 5, 13].

Верхнюю консоль изготовляют либо в виде короткого цилиндрического стержня, либо в виде жесткой шины с гнездом крепления электрододержателя. В первом случае она воспринимает изгибающий момент от усилия сжатия, во втором – выполняет лишь функцию токоподвода, а изгибающий момент воспринимается ползуном и корпусом машины. Через гибкие и жесткие шины верхняя консоль соединена со сварочным трансформатором.

Нижняя консоль, соединенная гибкими шинами с трансформатором, подводит ток к электрододержателю. В машинах малой мощности она является одновременно и элементом, воспринимающим нагрузку от усилия сжатия. В современных машинах средней и большой мощности ее полностью или частично разгружают нижним кронштейном.

Нижняя цилиндрическая консоль, закрепленная в токоведущем контакте, имеет возможность поворота вокруг оси и перемещения в продольном направлении (примерно на 10 % ее длины). Это облегчает регулировку соосности электродов и переналадку машины в зависимости от формы свариваемых узлов. Кроме того, нижнюю консоль вместе с нижним кронштейном можно перемещать вверх-вниз ступенчато (на шаг болтов) или плавно.

Консоли изготовляют из меди, высокоэлектропроводящих бронз цилиндрической или плоской формы обычно с внутренним водяным охлаждением. Консоли небольших машин, особенно для микросварки, имеют естественное (воздушное) охлаждение.

Жесткость силовых элементов (консолей, кронштейнов, стенок корпуса) в машинах точечной, рельефной и шовной сварки оценивают упругим вертикальным смещением электродов при номинальном усилии сжатия. При $l \leq 500$ мм смещение не должно превышать 1 мм, при $l = 500–1200$ – 1,5 мм, при $l \geq 1200$ – 2

мм. Домкрат уменьшает смещение, но ограничивает минимальные размеры свариваемых узлов (например, длину и диаметр обечаек).

Электрододержатели служат для крепления электродов, одновременно являясь силовыми и токоведущими элементами. Их изготовляют из медных сплавов с высокой электропроводимостью.

В машинах рельефной сварки электрододержатели и электроды заменяют токоподводящими плитами (столами) с Т-образными пазами. При групповой многоточечной сварке на них укрепляются электродные плиты с электродными вставками или целые сборочно-сварочные устройства для совмещения, фиксирования, закрепления деталей. В связи с резким увеличением усилия-сжатия применяют мощные и короткие кронштейны. Высокая жесткость всех конструктивных элементов машины позволяет сохранить в определенных допусках параллельность рабочих поверхностей контактных плит и электродов, обеспечить высокое качество соединений. Сохранить параллельность вне зависимости от деформации консолей можно перемещением верхней электродной плиты в общих с нижней плитой направляющих, колоннах. Однако в этих случаях необходима электрическая изоляция одной из плит относительно общих направляющих.

При неравенстве высоты рельефов, напротив, строгая параллельность контактных поверхностей вызывает неравномерное распределение тока и усилия. В этом случае более эффективна самоустановка одной из электродных плит путем ее шарнирного соединения с токоподводящей плитой.

В машинах шовной сварки вместо электрододержателей и электродов применяют роликовые головки (электродные устройства). Наиболее ответственным элементом роликовых головок является подвижный (скользящий) электрический контакт. Часто электрический контакт нагружают также и сжимающим усилием. В этом случае может значительно меняться его электропроводимость и уменьшаться стабильность соединений при эксплуатации. Такое положение имеет место в машинах малой и средней мощности. Однако это упрощает конструкцию головок. В машинах большой мощности и с значительными сварочными усилиями контакт разгружают, но головка усложняется.

В выпускаемых в настоящее время машинах применяется в основном два вида электродных устройств:

– устройства со скользящим контактом по типу «вал – втулка» (МШ-2201, МШ2202, МШ-3401, МШВ-4002, МШВ-7501, МШВ-8001, МШЛ-150);

– устройства со скользящим контактом, разгруженным от передачи сварочного усилия (МШ-3207, МШ3208, МШ3404, МШМ1, МШВ-1601, МШК-2002, МШВ-1202, МШВ-6303, МШН-7501, МШН-8501).

В машинах стыковой сварки (рис. 3.5) система токоподвода отличается от рассмотренных. Она состоит из контактных плит или подвижной и неподвижной колодок *3*, укрепленных в стальных плитах *5*. Гибкими шинами *2* к колодкам подводится ток от сварочного трансформатора *1*. На колодках монтируются электроды – губки *4*.

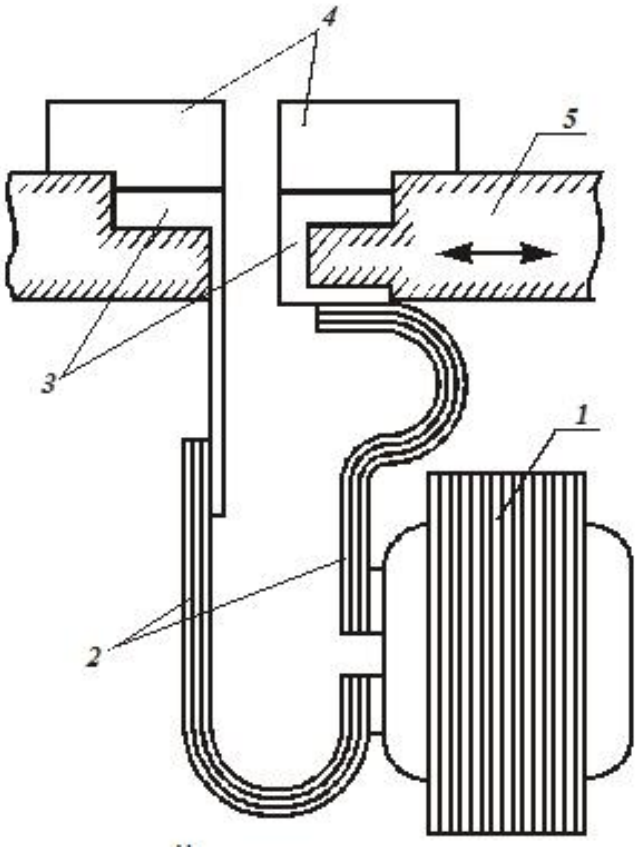


Рис. 3.5. Сварочный контур машины стыковой сварки

Применение сварочных трансформаторов специальной конструкции, у которых форма магнитопровода максимально при-

ближена к контуру деталей, сокращает размеры сварочного контура и сопротивление короткого замыкания. Например, в машинах для сварки труб использован кольцевой трансформатор, в котором магнитопровод представляет собой кольцо, набранное из электротехнической стали. На магнитопроводе равномерно распределена первичная обмотка, а вторичный виток, выполненный в виде пустотелого кольца коробчатой формы, присоединен с помощью гибких шин непосредственно к губкам. Вторичный виток выполняет также функции защитного кожуха. Сопротивление короткого замыкания машины с кольцевым трансформатором для сварки труб диаметром 720 мм (площадь поперечного сечения свыше 20000 мм^2) находится в пределах 8–12 мкОм.

Гибкие шины применяют для возможности перемещения подвижных сварочных головок и нижней консоли машин точечной, рельефной и шовной сварки, а также подвижной плиты при стыковой сварке. Такие шины изготовляют из прямоугольных свободно изогнутых листов медной фольги наборными или витыми и скрепляют болтами с другими жесткими токоподводящими элементами. В машинах микросварки иногда применяют гибкие провода из множества тонких проволок, впаянных в медные наконечники.

Гибкий кабель подвесных машин с отдельным трансформатором должен быть достаточно легким, гибким, длинным. Его изготовляют либо в виде двух отдельных проводов, либо в виде так называемого бифилярного кабеля, в котором параллельные изолированные проводники составляют прямую и обратную связь между клещами и трансформатором. В промежутках между проводниками циркулирует охлаждающая вода, что позволяет резко повысить плотность тока (до 100 А/мм^2). Бифилярный кабель обладает малой индуктивностью, уравновешенностью электродинамических сил и значительно меньшими толчками при включении тока, чем в случае двух отдельных проводов.

Жесткие шины изготовляют из медного проката в виде плит, полос, уголков с внутренним водяным охлаждением. Они обычно не несут силовых нагрузок и используются, как промежуточный элемент между клеммами сварочного трансформатора и гибкими шинами (в машинах точечной, рельефной, шовной сварки) или неподвижной плитой (в машинах стыковой сварки).

Контакты – участки крепления токоведущих элементов сварочного контура. Контакты разделяются на постоянные – неподвижные (в основном болтовые соединения), переменные – неподвижные (часто сменяемые соединения электрода с электрододержателем, последнего с консолью и др.) и подвижные (вращающиеся контакты в подшипнике роликовых головок шовных машин). Величина электрического сопротивления контактов в значительной мере меняется (особенно в переменных подвижных). Поэтому стремятся сохранить исходное качество контактов и снизить величину сопротивления за счет периодического подтягивания болтов, серебрения контактирующих поверхностей, применения электропроводящего смазочного материала и др.

3.4.3. Электроды

Электроды и ролики осуществляют непосредственный контакт машины со свариваемыми деталями. Электроды в процессе точечной и шовной сварки выполняют следующие основные функции:

1) сжимают детали,
2) подводят ток,
3) отводят теплоту, выделяющуюся в деталях при сварке,
4) перемещают детали (при шовной сварке).

Форма и размеры рабочей поверхности, контактирующей с деталями, и вся конструкция электродов в целом значительно влияют на качество сварных соединений и производительность процесса.

При точечной и шовной сварке электроды нагреваются до высоких температур за счет теплоты, выделяющейся непосредственно в них при протекании тока, и за счет передачи теплоты от свариваемых деталей. В контакте электрод-деталь на рабочей поверхности электродов могут развиваться температуры при точечной сварке сталей до 750° С и при сварке легких сплавов до 400° С, при шовной сварке эти температуры еще выше, а удельные давления могут достигать 400 МПа (при сварке жаропрочных сплавов и проковке легких сплавов) [3, 5, 13].

Характерной особенностью условий работы электродов является циклический характер действия температур и давлений.

При точечной сварке на относительно жестких режимах с малой производительностью (25–30 точек в минуту) за время паузы электрод обычно охлаждается до исходной температуры. При сварке с большой производительностью (100–150 точек в минуту), а также при использовании мягких режимов температура на рабочей поверхности электродов за время пауз лишь снижается до некоторого значения. Максимальные рабочие температуры в электродах значительно превосходят температуру рекристаллизации сплавов, применяемых для изготовления электродов, а иногда при сварке некоторых металлов (молибден, тантал) достигают температуры плавления. Циклические нагревы и охлаждения электродов при протекании тока усугубляются их водяным охлаждением (внутренним или наружным), что вызывает образование дополнительных термических напряжений.

Напряжения, возникающие под действием усилия сжатия, могут значительно превышать предел текучести металла электродов. Металл рабочей части роликов кроме напряжений сжатия испытывает напряжения сдвига, возникающие при передвижении свариваемых деталей. К металлу губок стыковых машин предъявляются требования высокой твердости, прочности, износостойкости.

Под действием усилия и высокой температуры в металле рабочей части электродов возникает неравномерная пластическая деформация, которая приводит к его неравномерному разупрочнению. Металл рабочей части подвержен сложному воздействию ползучести, термической усталости и динамических нагрузок.

Чем меньше теплопроводен металл электрода, тем больше перепад температуры и неравномернее распределение напряжений по сечению электродов и тем вероятнее образование трещин на рабочей поверхности. Установлено, что сопротивление образованию трещин выше у более пластичные металлов, несмотря на их пониженные прочностные характеристики.

Следует отметить, что трещины в электродах, как правило, образуются после увеличения диаметра контактной поверхности электрода при сварке более чем на 20%, т.е. после сварки 1,5–2 тыс. точек, и поэтому при правильной эксплуатации электродов (своевременной переточке) не отражаются на их стойкости.

Измерение твердости металла рабочей поверхности электродов после сварки большого числа точек показывает, что в

центральной ее части разупрочнение проявляется в большей степени, чем в периферийной зоне, а также возможно повышение твердости металла за счет наклепа при пластической деформации. Разупрочнение металла рабочей части электрода распространяется на глубину 1,5–2,5 мм и имеет место даже после переточки электрода [3, 5, 13].

Специфической особенностью работы электродов и роликов при сварке легких сплавов является налипание свариваемого металла на рабочую поверхность электродов и потемнение поверхности деталей в результате интенсивного перехода металла электрода на деталь. Как правило, при точечной и шовной сварке алюминиевых и магниевых сплавов взаимное загрязнение поверхностей электродов и свариваемых деталей происходит раньше, чем увеличение исходных (начальных) размеров рабочей поверхности электродов и роликов. Указанные эксплуатационные условия работы электродов служат основой требований к электродным сплавам.

Одним из основных требований, предъявляемых к электродным сплавам, является их высокая прочность при повышенных температурах. Через электроды контактных машин протекают большие токи; например, при точечной сварке алюминиевых сплавов плотность тока в средней части электродов может достигать 250–300 А/мм^2. Поэтому от металла, используемого для электродов и роликов, требуется также высокая электропроводность (особенно при сварке легких сплавов). При сварке некоторых легких сплавов с низкой коррозионной стойкостью (магниевые сплавы) следы меди на поверхности точек и роликовых швов не допускаются. В таких случаях металл электродов должен обладать низкой способностью к диффузии и схватыванию с металлом свариваемых деталей.

Стойкость электродов и роликов, под которой понимается способность сохранять размеры и форму рабочей поверхности, а при сварке легких сплавов, кроме того, противостоять взаимному переносу металла электродов и свариваемых деталей (загрязнению рабочей поверхности), зависит от режима и темпа сварки, свойств металла и толщины деталей, от конструкции и условий охлаждения электродов. Для изготовления электродов, роликов и губок используются специальные медные сплавы. При выборе

сплавов для электродов необходимо учитывать, что их электропроводность должна повышаться с увеличением электропроводности свариваемых металлов. Применение чистой меди Ml для электродов, роликов и губок не рекомендуется из-за низкой стойкости. Поэтому используют сплавы на основе меди, содержащих легирующие элементы Cd, Cr, Co, Ni, Ti, Be, Zr. С увеличением содержания легирующих элементов уменьшается электро- и теплопроводность меди. При сварке конкретных материалов применяют ту или иную марку электродов. В отдельных случаях рабочая часть электродов изготовляется из вольфрама и молибдена (в виде вставок и наконечников).

Конструкция электродов определяется способом сварки, типом соединения, толщиной и маркой свариваемых деталей, параметрами режима, условием охлаждения.

Электроды и ролики состоят из следующих частей: рабочей части, части, обеспечивающей соединение с машиной, и средней (основной) части. Каждая часть электродов в процессе работы выполняет определенные функции.

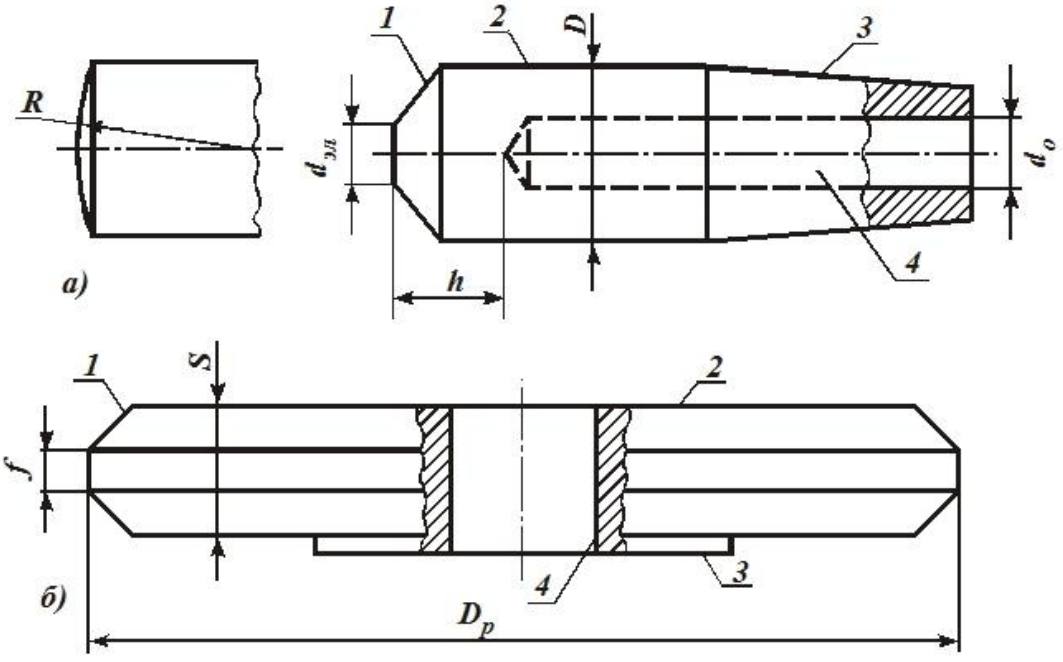


Рис. 3.6. Элементы конструкции электродов и роликов

Рабочая часть обеспечивает непосредственный контакт (электрический и механический) электрода со свариваемыми деталями и имеет рабочую поверхность *1* (рис. 3.6), форма и разме-

ры которой являются важной технологической характеристикой электрода (ролика) и параметром режима сварки. В настоящее время наиболее распространены две формы рабочей поверхности: плоская (цилиндрическая у роликов) и сферическая. Плоская рабочая поверхность у электродов определяется диаметром $d_{эл}$, цилиндрическая у роликов – шириной f, сферическая – радиусом R.

Средняя часть электродов соединяет рабочую и посадочную части и определяется диаметром D (у роликов толщиной S). ОСТ 16.0.801.407-87 на прямые электроды устанавливает следующие значения D: 12, 16, 20, 25, 32 и 40 мм. В зависимости от максимального усилия электродов машины $F_{эл}$ диаметр средней части в миллиметрах может быть определен из соотношения $D = (0,4...0,6)\sqrt{F_{эл}}$, , где $F_{эл}$ – в деканьютонах. Средняя часть обычно используется для закрепления соответствующих инструментов, применяемых при съеме электродов. Площадь контакта ролик-деталь зависит кроме f и R от диаметра ролика, поэтому значение $D_р$ (или радиус ролика $R_р$) также является характеристикой рабочей поверхности.

Части электродов и роликов, обеспечивающие их соединение с элементами вторичного контура машины, должны удовлетворять требованиям надежной передачи сварочного тока и усилия сжатия. У электродов для точечной сварки эти функции выполняет в подавляющем большинстве случаев конусная посадочная часть *3* (рис. 3.6, *а*), хотя не исключаются и другие виды соединений (на резьбе, по цилиндрической поверхности и т.п.). У роликов указанные функции выполняют их различные части: основной электрический контакт с машиной обеспечивается поверхностью *3* (рис. 3.6, *б*), а передачу усилия сжатия выполняет внутренняя поверхность *4*. Для получения хорошего электрического контакта (низкое сопротивление), а в электродах также герметичного соединения соединительные поверхности должны быть обработаны не ниже Rz 1,25 и не иметь механических повреждений, следов оксидов и других загрязнений.

Так как конечная посадочная часть электродов является продолжением средней (основной) части, то для обозначения размера конусов удобно применять диаметры D прямых электродов. По ОСТ 16.0.801.407-87 для диаметров конусов 12, 16, 20, 25

мм принята конусность 1:10, а для диаметров 32 и 40 мм с целью удобства съема электродов – 1:5. Указанные размеры конусов следует применять и при изготовлении непрямых (фигурных) электродов, так как посадочные отверстия электрододержателей сварочных машин имеют аналогичные размеры [5, 13].

Внутренняя часть большинства электродов для точечной сварки имеет канал *4* (рис. 3.6, *а*) для подачи охлаждающей воды. Внутри охлаждающего канала находится трубка, по которой поступает вода. Диаметр охлаждающего канала d_0 определяется необходимым для охлаждения расходом воды (при заданном давлении в сети) и достаточной прочностью электрода. В зависимости от диаметра электрода $d_0 = (0{,}5...0{,}6)D$. Расстояние h от рабочей поверхности до дна охлаждающего канала значительно влияет на эксплуатационные характеристики электродов (стойкость, число точек до полного износа). По опытным данным следует принимать $h = (0{,}75...0{,}8)D$.

В зависимости от конфигурации средней части электроды для точечной сварки подразделяются на прямые (рис. 3.7, *а*) и фигурные (рис. 3.7, *б*). Прямые электроды выполняются с симметричным расположением рабочей поверхности и со смещенной или скошенной рабочей поверхностью в соответствии с ОСТ 16.0.801.407-87.

К фигурным относятся электроды, у которых ось, проходящая через центр рабочей поверхности, значительно смещена относительно оси посадочной части. Наибольшее распространение имеют прямые электроды, которые используются при сварке деталей, имеющих свободные подходы для электродов. Фигурные электроды используются для сварки сложных деталей с затрудненным подходом для электродов.

При рельефной сварке применяются электроды с плоской рабочей поверхностью (рис. 3.7, *в*). Часто в одном или в обоих электродах предусматриваются отверстия для размещения выступающих частей свариваемых деталей. Если свариваемая деталь, контактирующая с одним электродом, располагается в отверстии другого электрода, то для предотвращения шунтирования тока это отверстие изолируется от детали (например, текстолитовой втулкой). Электроды при рельефной сварке имеют большую рабочую поверхность, чем при точечной сварке, поэто-

му сплавы, используемые для электродов, могут иметь пониженную электротеплопроводность.

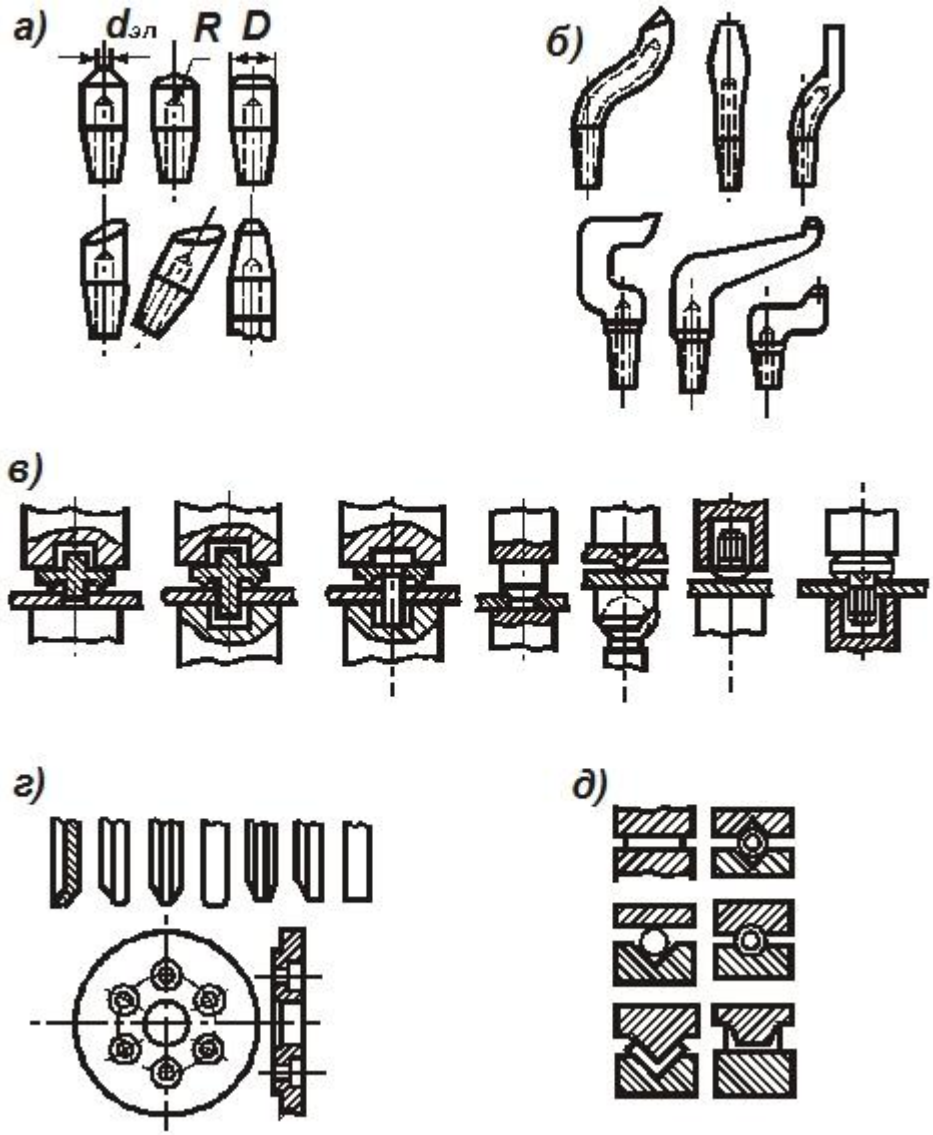


Рис. 3.7. Электроды машин контактной сварки:
а, *б* –точечной; *в* – рельефной; *г* – шовной; *д* – стыковой

Конструкция роликов для шовной сварки зависит от размеров и формы свариваемых узлов, способа крепления роликов на машине, а также от способа охлаждения. Наибольшее распространение имеют ролики с плоской и сферической рабочей поверхностью (рис. 3.7, *г*).

Губки стыковых машин не оказывают непосредственного влияния на формирование сварных соединений, подводят ток к деталям и удерживают их от проскальзывания при осадке. Губки,

не подводящие ток, часто изготовляются из стали, иногда на них делается насечка для увеличения трения. Рабочая поверхность губок должна соответствовать форме деталей (рис. 3.7, *д*). Для сварки прутков и толстостенных труб применяются призматические губки, а для сварки труб с толщиной стенки не более 0,15 наружного диаметра – только губки с цилиндрической рабочей поверхностью. Длина губок должна быть не менее 2,5 диаметра (толщины) свариваемых деталей [5, 13].

При сварке большинства металлов можно использовать электроды и ролики с плоской (цилиндрической) или сферической рабочей поверхностью. Электроды (ролики) со сферической поверхностью имеют большую стойкость и менее чувствительны к перекосам при установке, чем электроды с плоской поверхностью. Поэтому со сферической поверхностью рекомендуется изготовлять электроды, используемые в машинах радиального типа и клещах, а также фигурные электроды, работающие с большими прогибами. При сварке легких сплавов применяются электроды и ролики только со сферической рабочей поверхностью, так как использование электродов и роликов с плоской поверхностью приводит к чрезмерным вмятинам и подрезам на поверхности точек и швов и повышенным зазорам между деталями после сварки.

Размеры рабочей поверхности электродов и роликов для сварных соединений группы А (ГОСТ 15878-79) выбираются в зависимости от толщины и марки свариваемых металлов (см. п. 2.1.3 второй части).

Важнейшим вопросом эксплуатации является поддержание необходимых формы и размеров рабочей поверхности. Следует различать зачистку и переточку – восстановление изношенной рабочей поверхности. Зачистка электродов обычно производится непосредственно в сварочной машине. Для переточки электроды снимаются со сварочной машины, и выполняется обработка поверхности на токарном или специальном станке.

Зачистка заключается в снятии с рабочей поверхности весьма малого слоя окисленного и загрязненного металла (толщиной 0,03–0,05 мм). Зачистка электродов с плоской рабочей поверхностью выполняется личным напильником и абразивным полотном. При этом необходимо сохранить параллельность поверхностей обоих электродов. Электроды со сферической поверхностью за-

чищаются при помощи резиновой пластины толщиной 15–20 мм, обернутой абразивным полотном.

Необходимость зачистки устанавливается сварщиком визуально по степени загрязнения поверхностей электродов и свариваемых деталей. При сварке коррозионностойких металлов (нержавеющие, жаропрочные стали и сплавы, титан) без зачистки может быть выполнено очень большое число точек (до 5 тыс.). Сварка же алюминиевых и магниевых сплавов характеризуется быстрым загрязнением электродов (от 10–15 до нескольких сотен точек). При роликовой сварке алюминиевых и магниевых сплавов зачистка производится через 1–3 оборота роликов. Очень интенсивно загрязняются электроды и ролики при сварке металлов с покрытиями (лужение, цинкование), а также при наличии на поверхности деталей ржавчины, окалины, масла и других загрязнений.

При эксплуатации электродов и роликов особое внимание должно быть обращено на обеспечение хорошего электрического контакта посадочной поверхности с электрододержателями и осями роликов. Износ или неправильные размеры мест посадки вызывают нагрев из-за повышения сопротивления контактов, течи воды из-за отсутствия герметичности конечного соединения и затрудняют съем электродов. Посадочные (контактные) поверхности тщательно зачищаются и плотно подгоняются. Не допускается применение каких-либо прокладок в местах посадки. Конусные посадочные поверхности электродов и электрододержателей необходимо периодически (не реже одного раза в месяц) контролировать специальными калибрами.

3.4.4. Механизмы контактных машин

Машины общего назначения имеют различные механизмы: сжатия, вращения деталей, зажатия, осадки. В специализированных машинах, кроме того, могут быть механизмы перемещения, формообразования, закрепления, съема деталей и др.

Механизм – это совокупность силового привода (например, пневмоцилиндра, электродвигателя) и исполнительных элементов (ползуна, направляющих рычагов, муфт, редуктора и др.).

Механизмы сжатия деталей и типы приводов машин.Такие механизмы должны обеспечивать подъем, опускание, перемеще-

ние подвижного зажима и сжатие деталей с заданной программой по усилию и длительности. В машинах точечной сварки этот механизм осуществляет два перемещения электродов: рабочее (2s + 3÷5 мм), при котором детали передвигаются на шаг, и дополнительное (увеличенное) для зачистки, смены электродов, установки и съема деталей. В машинах с рычажным, педально-грузовым, пружинным приводами перемещение электродов является одновременно рабочим и дополнительным. Оба типа перемещения обычно совпадают в машинах шовной и рельефной сварки, а для машин стыковой сварки понятие о рабочем и дополнительном перемещениях вообще отсутствует Циклограмма сжатия по усилию и длительности может быть различной (см. рис. 2.18 второй части учебного пособия).

В машинах точечной, рельефной и шовной сварки применяют следующие типы приводов: ручной, грузовой, пружинный, пневматический, гидравлический, иногда электромагнитный.

Рычажный (ручной) механизм применяют в небольших точечных машинах, клещах, пинцетах при микросварке, а также в переносных пистолетах для сварки и прихватки. Усилия сжатия при простейшей циклограмме *а* (рис. 2.18 второй части учебного пособия) прикладывают к деталям либо через систему рычагов, либо непосредственно вручную. Такой механизм создает небольшое усилие (до 30 даН), достаточное для соединения деталей толщиной до 0,1 мм. Непостоянство усилия, утомляемость сварщика – серьезные недостатки этого механизма.

Педально-грузовой механизм – простой и надежный, с постоянным усилием сжатия (циклограмма *а,* рис. 2.18 второй части учебного пособия). Регулируют $F_{св}$ перемещением груза по рычагу с делениями. Опускают электрод прикладыванием усилия *F* на педаль, преодолевая усилие пружины в системе рычагов. Подъем производится пружиной при снятий *F*. Величина $F_{св}$ определяется грузом и его положением на рычаге. Точность усилия зависит от точности установки груза, а также от сил трения в направляющих рычагах. Значительные усилия на педали вызывают сильное утомление сварщика. Поэтому такой механизм используют в машинах мощностью до 10 кВА и при усилиях до 100 даН (в не-

больших конденсаторных машинах, монтажных столах для микросварки).

Пружинный механизм сжатия с педальным приводом также весьма прост и надежен. Как и предыдущий, он создает лишь циклограмму *а* (см. рис. 2.18 второй части учебного пособия). При нажатии на педаль с силой *F* (до упора) верхний электрод опускается и сжимает детали. Сварочное усилие определяется предварительным сжатием пружины гайкой в системе рычагов. Подъем электрода производится грузом. Зависимость $F_{св}$ от состояния пружины и раствора между электродами, большое усилие на педали и быстрая утомляемость сварщика ограничивают применение этого механизма лишь небольшими машинами переменного тока мощностью до 20 кВА и сварочным усилием до 250 даН. В некоторых машинах пружину сжимают с помощью электромагнита, пневмопоршня. Это облегчает работу оператора и повышает темп сварки [5, 13].

Современные пневматические и гидравлические приводы машин контактной сварки отличаются разнообразием конструкций и технических показателей. Они имеют диаметры цилиндров 25–400 мм и работают при давлениях воздуха 0,16–1,6 МПа и давлениях масла 5–20 МПа. Скорость перемещения отдельных приводов превосходит 1 м/с. Известны пневматические приводы сжатия точечных машин, обеспечивающих производительность 600 сварок в минуту и более. В точечных машинах усилия приводов обычно лежат в пределах 0,5–209 кН, в стыковых могут достигать 1000 кН и более.

Пневматические и гидравлические приводы контактных машин можно классифицировать следующим образом:

- по давлению питания: пневмоприводы нормального давления (до 0,63 МПа), повышенного давления (да 1,6 МПа) и низкого давления (до 0,16 МПа). Гидроприводы работают в пределах высоких давление питании – от 6,3 МПа и выше;
- по характеру развиваемого усилия: с постоянным усилием; со ступенчатым изменением усилия; с непрерывным изменением усилия, с импульсным изменением усилия, с периодическим усилием – пульсирующим, знакопеременным, прерывистым и т.д.;

- по виду передачи к рабочему органу машины: прессового типа; радиального типа; с промежуточной передачей;
- по виду силового элемента: поршневые; диафрагменные; комбинированные;
- по числу и назначению камер рабочего цилиндра: двухкамерные без проковки; двухкамерные с проковкой (осадкой); двухкамерные с разгрузочной камерой; с дополнительной камерой; с буферной камерой; многокамерные;
- по величине рабочего хода: без дополнительного хода; с дополнительным ходом;
- по конструкции рабочих поршней: с одним рабочим поршнем; с последовательно расположенными поршнями; с коаксиально расположенными поршнями.

Пневматический механизм сжатия наиболее распространен особенно в машинах средней и большой мощности (до 1000 кВА) и охватывает широкий интервал усилий (30–25000 даН). Быстродействующий, легко управляемый, глубоко регулируемый, этот механизм работает обычно в автоматическом режиме, чаще в сочетании с синхронным прерывателем. Такой механизм весьма универсален. Он может обеспечивать любую циклограмму (см. рис. 2.14) и широкую регулировку усилий (F_{min}/F_{max} до 1/45). Силовые элементы этого механизма – поршни и гибкие диафрагмы.

Поршневой привод (рис. 3.8, *а*) имеет увеличенный ход. Он отличается высокой надежностью, но большими размерами камер, невысоким быстродействием и значительными силами трения. Усилие, передаваемое на электрод, регулируют давлением воздуха в камере *А*. Такой цилиндр обеспечивает два диапазона усилий: малые и большие. При подаче клапаном воздуха в обе камеры создают небольшое сварочное усилие, определяемое разностью площадей поршня. Цилиндр работает, противодавлением. Иногда для расширения диапазона усилий давление в камере *Б* изменяют независимо от *А*. При подаче сжатого воздуха только в *А* (и сообщении *Б* с атмосферой) получают большое усилие (ковочное, предварительного обжатия, увеличенное сварочное).

Диафрагменный привод (рис. 3.8, *б*) имеет малый ход (до 20 мм), поэтому для дополнительного хода электродов необходимо особое пневматическое или электромеханическое устройство.

Кроме того, при перемещении (изгибе) диафрагмы усилие остается постоянным лишь в определенных пределах (около ее нейтрального положения). Резиновые диафрагмы стареют. Однако большое преимущество привода – простота конструкции, отсутствие смазки, минимальное трение, малые размеры камер, быстрое их заполнение, а поэтому высокое быстродействие, т.е. отличные динамические характеристики. Как и пневмоцилиндр, такая камера может работать в двух диапазонах усилий в зависимости от наличия или отсутствия воздуха в камере *Б*.

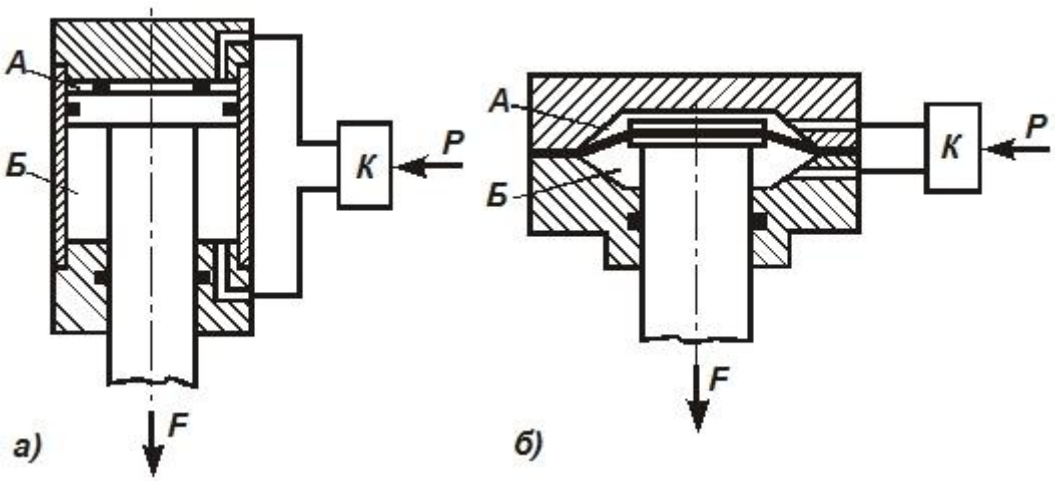


Рис. 3.8. Силовые элементы пневматического механизма сжатия:
а – поршневого типа, *б* – диафрагменного типа

Приводом механизма сжатия машин рельефной сварки обычно служит пневмоцилиндр, позволяющий вести процесс с переменным усилием. В машинах шовной сварки чаще применяют пневмоцилиндр, но в мощных машинах (МШВ-8001, МШВ-8002-1) – диафрагменные камеры.

Управление работой пневматического механизма сжатия осуществляется пневматической аппаратурой – клапанами, редукторами, дросселями, фильтрами, маслораспылителями и т д.

Для управления подачей воздуха в камеры и выходом в атмосферу применяют электропневматические клапаны.

Для ускорения выброса воздуха из камеры (например, при проковке) применяют неуправляемый выхлопной клапан.

Для регулирования скорости перемещения поршней и диафрагм, смягчения ударов при опускании электродов применяют дроссели с обратным клапаном [5, 13].

Гидравлический механизм сжатия широко применяют в клещах и многоточечных машинах. Большое давление масла (5-10 МПа) позволяет резко уменьшить площадь цилиндров и массу механизма, а также уменьшить расстояние между электродами в многоточечных машинах. В качестве рабочей жидкости обычно применяют минеральное масло. Вода малопригодна, поскольку вызывает коррозию, не обеспечивает смазывание трущихся элементов, имеет низкую вязкость, затрудняющую уплотнение. Растительные масла склонны к смолообразованию.

В многоточечных машинах большое давление обычно создают насосами, а в подвесных машинах – пневмогидравлическими преобразователями (мультипликаторами) давления; работа последних легко синхронизуется с циклом сварки.

Плавное возрастание $F_{св}$ в электромагнитном механизме сжатие (рис. 3.9) получают увеличением тока в катушке *1* электромагнита, подвижный магнитопровод *2* которого связан с ползуном. Такой механизм, особенно в сочетании с грузовым 3 или пневматическим механизмом, позволяет получить любую циклограмму усилия. Катушку электромагнита питают либо от самостоятельного источника электроэнергии *4* (по заранее заданной программе), либо от первичной цепи сварочного трансформатора *5*. В последнем случае при увеличении тока плавно возрастает и сварочное усилие. Электромагнитный механизм сжатия и комбинированный применяют в небольших точечных машинах, например в микросварке, где требуется тонкая регулировка формы $F_{св}$ с плавным, но быстрым его нарастанием.

Механизмы вращения роликов. Такой механизм должен обеспечивать надежное перемещение деталей при сварке. Различие его конструкций вносит дополнительное разнообразие в компоновку шовных машин.

Ведущий (обычно один) ролик приводной, другой вращается вхолостую от трения с деталью. Поэтому механизм должен исключать проскальзывая не ведомого ролика. В машинах для поперечной сварки ведущим роликом является, как правило, нижний; в машинах для продольной сварки и в универсальных – верхний. Существует также механизм с подачей крутящего момента сразу на оба ролика.

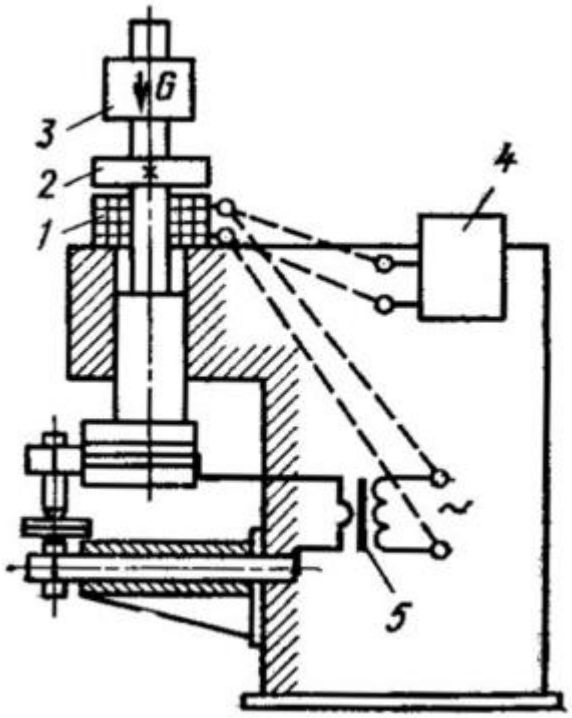


Рис. 3.9. Схема электромагнитного механизма сжатия деталей при точечной сварке

В зависимости от назначения, мощности и типа машины вращение роликов может быть *непрерывным и прерывистым*.

Механизм непрерывного вращения обычно состоит из асинхронного электродвигателя, редуктора, сменных шестерен, карданного вала и устройства для плавного регулирования скорости вращения роликов. Таким устройством чаще всего служит бесступенчатый вариатор скоростей – электроуправляемая муфта скольжения типа ПМС (машины МШ-2001, МШ-3201, МШВ-4002, МШВ-1601).

Механизм прерывистого вращения обычно выполняют на базе электродвигателя постоянного тока с регулируемой скоростью вращения. Кинематическая цепь часто включает электромагнитную муфту. Ее устанавливают между двигателем и редуктором. С ее помощью обеспечивают легкий пуск, остановку роликов и широкую регулировку периодичности вращения.

При сварке деталей из сталей с легкоплавкими покрытиями и в микросварке при малых усилиях во избежание проскальзывания роликов каждый из них делают ведущим. От асинхронного электродвигателя через муфту, редуктор, шестерни и карданные

валы вращение передается двум стальным шарошкам, которые имеют коническую проточку с острой накаткой и плотно прижимаются к поверхности роликов. Вне зависимости от диаметра роликов их линейная скорость остается одинаковой (из-за одинакового диаметра шарошек).

Механизмы сжатия машин стыковой сварки. Механизм сжатия стыковых машин выполняет следующие функции. При сварке сопротивлением он обеспечивает сжатие деталей и их деформацию (во время нагрева и осадки); при сварке оплавлением – плавное сближение деталей по определенному закону (во время оплавления) и быстрое сближение, деформацию деталей (при осадке). При использовании прерывистого подогрева сопротивлением механизм сжатия осуществляет возвратно-поступательное движение, а также сжатие и некоторую деформацию деталей в моменты замыкания сварочной цепи.

В механизмах сжатия стыковых машин применяют следующие типы приводов: ручные, рычажные, пружинные, электродвигательные, пневматические, гидравлические, пневмогидравлические и комбинированные.

Рычажный механизм состоит из системы коленчатых рычагов, позволяющих получить усилие осадки, в десятки раз превышающее усилие, прилагаемое сварщиком (до 50 кН). Его применяют в неавтоматических машинах мощностью до 100 кВА. Пружинный привод обычно используют в машинах небольшой мощности для сварки сопротивлением. Сжатие деталей при сварке происходит под действием предварительно сжатой пружины [5, 13].

Электродвигательный привод применяют в автоматических и полуавтоматических машинах для перемещения подвижного зажима при оплавлении и осадке. В полуавтоматических машинах с электродвигательным приводом предварительный подогрев обычно осуществляют с перемещением деталей при помощи ручного рычажного привода.

В машинах, предназначенных для сварки однотипных деталей, когда не требуется частого изменения режима сварки, широко используют кулачковый механизм сжатия, кинематическая схема которого приведена на рис. 3.10. Подвижная плита *1* с зажимом перемещается кулачком *3* через опорный ролик *2*. Кула-

чок вращается от электродвигателя *6* через клиноременную *4* и червячную *5* передачи. Скорость увеличения радиуса профиля кулачка в точке соприкосновения с опорным роликом определяет скорость перемещения подвижного зажима при оплавлении и осадке. При использовании электродвигателя переменного тока скорость вращения кулачка при сварке постоянна, но может изменяться при настройке машины с помощью вариатора скорости *7* или сменных шестерен. Усилие, развиваемое приводом при осадке, не превышает 70–80 кН. Для увеличения усилия осадки в мощных машинах (400–750 кВА) между кулачком и подвижным зажимом используют рычажную передачу.

Недостаток кулачкового механизма – ограниченная скорость осадки (до 20–25 мм/с). Поэтому многие машины стыковой сварки имеют комбинированный механизм сжатия – кулачковый при оплавлении и пневматический, пневмогидравлический при осадке.

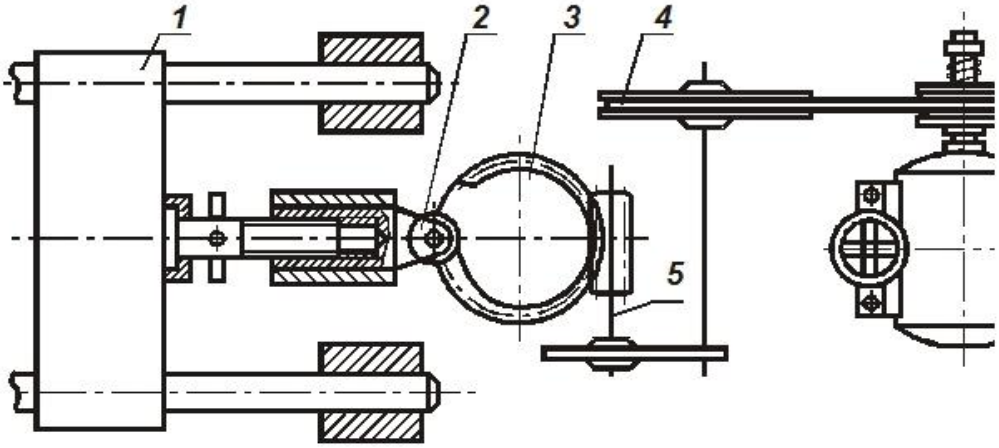


Рис. 3.10. Механизм сжатия машин стыковой сварки с кулачковым электродвигательным приводом

Пневматические механизмы сжатия – быстродействующие; их используют главным образом при осадке, так как они не обеспечивают необходимой плавности и стабильности перемещения зажима в процессе оплавления. Наряду с использованием пневмоцилиндров в таких механизмах применяют диафрагменные камеры.

Гидравлический механизм подачи широко применяют в машинах средней и большой мощности. Он надежен в работе, обеспечивает широкие пределы регулирования скорости подачи и развивает практически любые усилия осадки (3000 кН и более).

В машинах с гидравлическим механизмом скорость перемещения подвижного зажима изменяется либо регулированием проходного сечения дросселя, через который протекает масло из одной полости гидроцилиндра в другую, либо следящим золотниковым устройством.

Дроссель управляется механически с помощью тяги, связанной с подвижным зажимом, или электромеханическим устройством.

Существенный недостаток гидравлического механизма сжатия с дросселем – зависимость закона перемещения зажима от давления в гидросистеме и вязкости рабочей жидкости.

Гидравлический механизм сжатия со следящим золотниковым устройством работает в широком диапазоне скоростей перемещения и позволяет легко осуществлять программирование и автоматическое управление процессом оплавления.

Скорость осадки определяется пропускной способностью клапанов и соединительных трубопроводов, а также производительностью насоса. В мощных машинах при осадке для увеличения ее скорости масло подается из специального гидроаккумулятора.

В машинах, предназначенных для импульсного оплавления, гидравлический механизм сжатия содержит устройства, обеспечивающие получение колебательных движений подвижного зажима при оплавлении.

Зажимные механизмы и упорные приспособления машин стыковой сварки. Зажимы выполняют следующие функции: обеспечивают точную установку деталей относительно друг друга, токоподвод к деталям от источника тока и исключают проскальзывание деталей при осадке.

Применяют два способа установки деталей в зажимах: с упорами и без упоров.

Без упоров сваривают длинные детали (полосы, рельсы, трубы и др.). В этом случае применяют большие давления зажатия, так как усилие осадки передается на детали силами трения, развиваемыми между деталями и губками. При сварке с упорами усилие осадки передается на детали главным образом упорами, и токоподводящие губки значительно разгружаются. Конструкции зажимов очень разнообразны и определяются формой и размера-

ми свариваемые деталей, необходимым усилием зажатия и характером производства.

На машинах малой и средней мощности применяют эксцентриковые винтовые или рычажные с ручным приводом и пневматические зажимные механизмы; на машинах средней и большой мощности – пневмогидравлические, гидравлические и зажимы с электроприводом.

Гидравлические зажимные механизмы применяют в машинах с гидравлическим механизмом подачи. Они отличаются относительной простотой конструкции и имеют меньшие размеры. Иногда для уменьшения диаметра цилиндров зажатия применяют сдвоенные цилиндры (тандем-цилиндры). Для машин с усилием зажатия 100–500 кН масло подается в цилиндры зажатия непосредственно от гидронасоса машины под давлением 7–10 МПа. Для машин с усилием зажатия 1000–4000 кН и выше давление в цилиндрах зажатия повышается до 40–60 МПа. Для этого используют либо специальные насосы, либо мультипликаторы давления.

Наряду с гидравлическими зажимными механизмами прямого действия с целью увеличения усилия зажатия применяют рычажные гидравлические механизмы.

Упорные приспособления воспринимают усилие осадки и предотвращают проскальзывание деталей в зажимах. Конструкции упорных приспособлений определяются формой и размерами свариваемых деталей. Упоры устанавливают на плитах сварочной машины, а при сварке длинных деталей – на специальных направляющих. На машинах, предназначенных для сварки коротких деталей, когда не требуется большого диапазона регулирования, упоры объединяют с зажимными механизмами [5, 13].

3.5. Электрическая часть контактных машин

3.5.1. Назначение и основные электрические показатели

Электрическая часть машин должна развивать при сварке требуемую мощность с достаточно высоким КПД и без недопустимого нагрева ее элементов; иметь соответствующую нагрузочную характеристику и обеспечивать безопасность работы. При этом важным показателями машин является потребляемая мощ-

ность из сети при заданном сварочном токе, коэффициент мощности машины и другие параметры.

Основными параметрами электрической части машин контактной сварки установлены ГОСТ 297-80: максимальный ток короткого замыкания во вторичном контуре машины $I_{2k\max}$; номинальный длительный вторичный ток $I_{2дл.н}$ и наибольшая длительность прохождения сварочного тока $t_{св}$.

Машины контактной сварки, как правило, работают в режиме с постоянными чередованиями включения и выключения сварочного тока, связанными с установкой деталей для сварки, съемом деталей и другими операциями.

Такой режим работы электрической машины, при котором кратковременная нагрузка (сварочный ток) чередуется с отключениями машины (пауза), называется повторно-кратковременным режимом. Он характеризуется относительной (в процентах) продолжительностью включения (ПВ), определяемой по формуле:

$$ПВ=100t_{ц}/t_{св}=100t_{св}/(t_{св}+t_{п}), \qquad (3.1)$$

где $t_{св}$ – время сварки; $t_{ц}$ – пауза (отсутствие тока) и $t_{п}$ – длительность полного цикла сварки

ПВ зависит от назначения машины и обусловлено технологией изготовления изделий тем или иным видом контактной сварки (для точечных машин 20%, шовных 50%, стыковых 20-30%, для трубосварочных станов 100%).

ГОСТ 297-80 устанавливает номинальный длительный вторичный ток $I_{2дл.н}$, при протекании которого нагрев элементов вторичного контура и трансформатора не превышает допустимых температур: для элементов вторичного контура не более 100 °С; для обмоток сварочного трансформатора 60–140 °С в зависимости от условий охлаждения и класса изоляции.

Соотношение между кратковременным и длительным токами выводят из равенства теплоты, выделяемой в токоведущем элементе с сопротивлением r за время $t_{ц}$ при продолжительном режиме работы (ПВ=100%), и теплоты, выделяемой при протекании тока в повторно-кратковременном режиме (ПВ):

$$I_{кр} = I_{дл}\sqrt{ПВ/100} \qquad (3.2)$$

или

$$I_{дл} = I_{кр}\sqrt{ПВ/100} \qquad (3.3)$$

Из соотношения следует, что при малых ПВ можно получить очень большой кратковременный ток во вторичном контуре. Кратковременный ток не может быть больше максимального значения тока короткого замыкания $I_{2k\max}$ машины, зависящего от максимального вторичного напряжения сварочного трансформатора (в режиме холостого хода) $U_{20\max}$ и полного сопротивления короткого замыкания Z_{2k} машины:

$$I_{2k\max} = U_{20\max}/Z_{2k} \qquad (3.4)$$

Сварочный ток зависит от электрического сопротивления свариваемых деталей $r_{ээ}$ и вторичного напряжения U_{20} трансформатора:

$$I_{св} = U_{20}/Z_2 = U_{20}/\sqrt{(r_{ээ}+r_{2k})^2 + x_{2k}^2}, \qquad (3.5)$$

где r_{2k} и x_{2k} – активное и индуктивное сопротивление короткого замыкания машины, приведенное ко вторичному контуру; $Z_2 = \sqrt{(r_{ээ}+r_{2k})^2 + x_{2k}^2}$ – полное сопротивление машины и свариваемых деталей. Графическое изображение этих сопротивлений наглядно представлено в виде треугольника на рис. 3.11.

Соотношение между токами $I_{2k}/I_{св}$ колеблется в широких пределах: от 1,1–1,2 до 3 и более в зависимости от соотношения $r_{ээ}/Z_{2k}$. Значения U_{20} и $Z_2 = \sqrt{r_{2k}^2 + x_{2k}^2}$ определяется схемой получения и регулирования сварочного тока и конструктивным исполнением машины. Для осуществления сварки за время $t_{св}$ во вторичном контуре и через детали должен протекать заданный ток $I_{св}$.

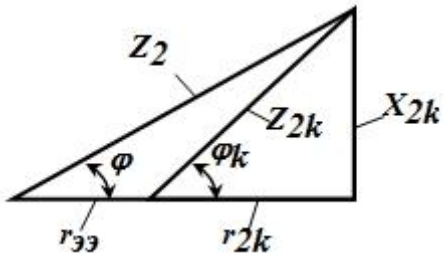


Рис. 3.11. Треугольник сопротивлений

Если электросопротивление (в основном активное) свариваемых деталей равно $r_{ээ}$, то активная (полезная) мощность, развиваемая на участке цепи между электродами равна:

$$P_{ээ} = r_{ээ} I_{св}^2 = U_{ээ} I_{св}, \tag{3.6}$$

где $U_{ээ}$ – падение напряжения на электродах,

$$U_{ээ} = r_{ээ} I_{св}, \tag{3.7}$$

Коэффициент полезного действия машины (КПД)

$$\eta = P_{ээ} / P_1, \tag{3.8}$$

где P_1 – активная мощность, потребляемая машиной из сети,

$$P_1 = (r_{ээ} + r_{2k}) I_{св}^2. \tag{3.9}$$

При точечной и шовной сварке на однофазных машинах переменного тока часто $r_{ээ} < Z_{2k}$, поэтому η = 0,1÷0,3. При стыковой сварке оплавлением $r_{ээ} > Z_{2k}$ и η > 0,9.

Полезная мощность меньше активной мощности, забираемой из сети, вследствие потерь во вторичном контуре, трансформаторе и в контакторах, особенно при сварке деталей из алюминиевых сплавов.

Полная кратковременная мощность машины, необходимая для выполнения сварочной операции:

$$S = Z_2 I_{св}^2, \tag{3.10}$$

а предельная (максимальная) при коротком замыкании электродов машины

$$S_{k\max} = Z_{2k} I_{2k\max}^2. \tag{3.11}$$

Коэффициент мощности определяется из соотношений

$$\cos\varphi = P_1 / S = (r_{ээ} + r_{2k}) / Z_2, \tag{3.12}$$

а при коротком замыкании электродов $\cos\varphi_k = r_{2k} / Z_2$, причем $\cos\varphi_k$ всегда меньше $\cos\varphi$ (см. рис. 3.11).

С увеличением сопротивления r_{2k} машины $\cos\varphi$ увеличивается, КПД η уменьшается.

Степень полезного использования мощности машины характеризуется коэффициентом

$$\nu = P_{ээ} / S = \eta \cos\varphi = r_{ээ} / Z_{2k}, \qquad (3.13)$$

при сварке деталей из сталей ν = 0,1÷0,4; при сварке деталей из алюминиевых сплавов ν = 0,025÷0,08.

С целью улучшения энергетических показателей ($\cos\varphi$, η, ν) контактных машин стремятся снизить сопротивление короткого замыкания Z_{2k} машины, уменьшая частоту питающего вторичный контур напряжения и размеры вторичного контура [5, 13].

3.5.2. Нагрузочные и внешние характеристики машин

Наглядное представление об изменении сварочного тока $I_{св}$ машины в зависимости от электрического сопротивления деталей $r_{ээ}$ дает **нагрузочная характеристика**, т.е. $I_{св}=f(r_{ээ})$.

Нагрузочную характеристику рассчитывают по соотношению (3.5) для каждой ступени трансформатора. Значение Z_2 выбирают в диапазоне от нуля (ток короткого замыкания) до 200-300 мкОм и более.

Анализ формулы показывает, чем больше полное сопротивление машины Z_2, тем наклон характеристики более пологий. Так на рис. 3.12, *а* приведены нагрузочные характеристики машин двух типов: *1* – однофазной переменного тока и *2* – с выпрямлением тока во вторичной цепи (при x_{2k}=0). Машина с выпрямлением тока *2* имеет крутопадающую характеристику, а машина однофазная переменного тока – пологопадающую. Наклон их имеет прямое отношение к процессам саморегулирования (изменению $I_{св}$, $P_{ээ}$ и $U_{ээ}$) при возмущениях $r_{ээ}$, которые оказывают существенное влияние на качество сварки (при стыковой сварке во время оплавления, при точечной, рельефной и шовной от произвольных колебаний $d_{эл}$, $F_{св}$ шунтирования тока).

При сварке на машине *2* в случае изменения $r_{ээ}$ значение $I_{св}$ отклонится от исходного в значительно большей степени, чем на машине *1*, что в большей степени компенсирует снижение $P_{ээ}$ и приведет к стабилизации процесса тепловыделения в зоне сварки.

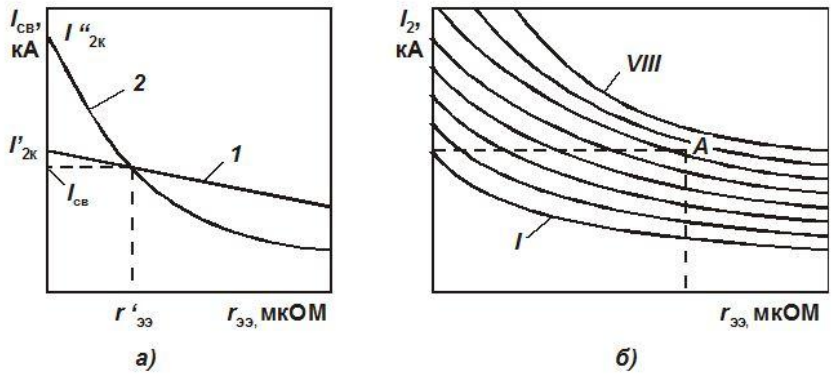


Рис. 3.12. Нагрузочные характеристики:
а – однофазной машины переменного тока (*1*) и машины с выпрямлением тока во вторичном контуре (*2*); *б* – машины с восьмью ступенями регулирования

В паспорте машины обычно приведены НХ для всех ступеней сварочного трансформатора, по которым можно определить пригодность машины и ступень регулирования вторичного напряжения трансформатора для сварки деталей данной толщины и марки материала. Так, например, зная $r_{ээ}$ и необходимое значение $I_{св}$ по нагрузочной характеристики (рис. 3.12, *б*) находят точку *A*, определяющую необходимую ступень трансформатора.

Внешняя характеристика машины. Для однофазных машин переменного тока наряду с нагрузочной характеристикой используют и внешние характеристики – зависимости напряжения на электродах от сварочного тока, т.е. $U_2=f(I_{св})$, для различных ступеней трансформатора.

Зависимость $U_2=f(I_{св})$ может быть выражена из соотношения (3.5):

$$U_2 = \sqrt{U_{20}^2 - x_{2k}^2 I_{св}^2} - r_{2k} I_{св}. \qquad (3.14)$$

При холостом ходе ($r_{ээ}=\infty$) $I_{св}=0$ и $U_2=U_{20}$, а при коротком замыкании ($r_{ээ}=0$) $I_{2k}=U_{20}/Z_{2k}$ и $U_2=0$. Промежуточные точки находят при значениях токов, меньших I_{2k}.

Наклон внешних характеристик зависит от сопротивления Z_{2k}. При заданном U_{20} чем меньше Z_{2k} машины, тем больше I_{2k}, а внешняя характеристика положе. Машины с пологопадающей нагрузочной характеристикой имеют крутопадающую внешнюю характеристику, и наоборот.

На рис. 3.13, *а* представлены внешние характеристики *1* и *2* соответственно машин *1* и *2*, а также приведена прямая линия $r_{ээ}I_{св}=U_{ээ}$, представляющая собой падение напряжения на свариваемых деталях. Точка пересечения этой прямой с внешними характеристиками машин определяет сварочный ток для данных деталей и падение напряжения на электродах. При сварке деталей с сопротивлением $r_{ээ}$ на выбранных ступенях трансформатора ток будет один и тот же.

По внешним характеристикам, как и по нагрузочным, выбирают необходимую ступень трансформатора для сварки конкретных деталей. Так, если к внешним характеристикам (рис. 3.13, *б*) провести две линии *OA* и *OB*, представляющие собой напряжение $r_{ээ}I_{св}$ для деталей минимальной и максимальной толщины, то проекции точек пересечения внешних характеристик с линией *AB* дадут значения токов для сварки деталей от минимальной до максимальной толщины. Зная значение $I_{св}$ проводят вертикальную линию до пересечения с линией *AB* и определяют необходимую ступень трансформатора.

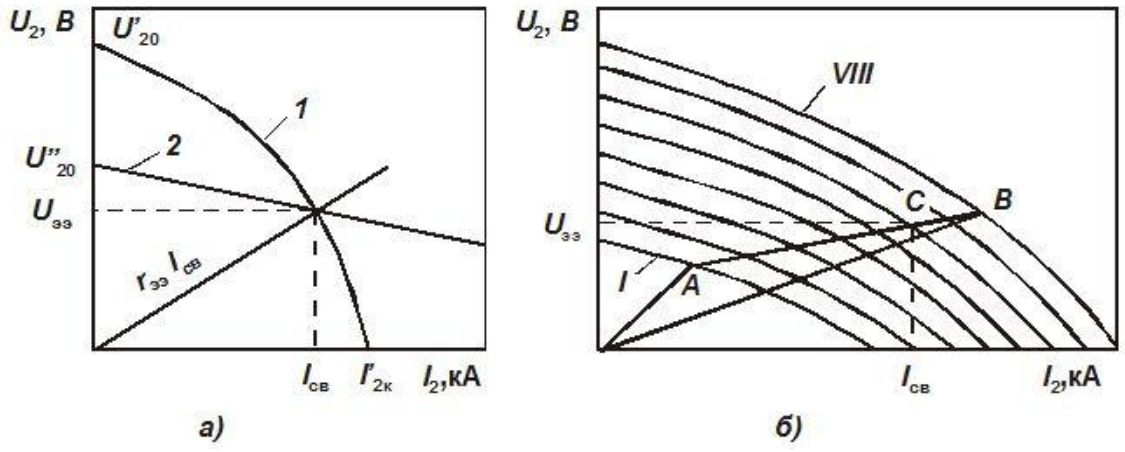


Рис. 3.13. Внешние характеристики:
а – однофазной машины переменного тока (*1*) и машины с выпрямлением тока во вторичном контуре (*2*); *б* – машины с восьмью ступенями регулирования

3.6. Электрические цепи основных типов контактных машин

Каждая машин для контактной сварки имеет электрическую силовую часть, в которой электрическая энергия сети преобразуется в требуемый вид (по силе, форме и продолжительности).

По роду питания, преобразования или аккумулирования энергии различают следующие основные типы машин – однофазные переменного тока, трехфазные низкочастотные, постоянного тока (с выпрямлением тока во вторичном контуре) и конденсаторные.

Необходимое значение и форму сварочного тока $i_{св}$, протекающего через детали, получают путем преобразования или аккумулирования электрической энергии сети промышленной частоты 50 Гц, напряжением 380 В (или 220 В в машинах с наибольшей мощностью короткого замыкания менее 60 кВа) с помощью сварочных трансформаторов, выпрямителей или аккумуляторов энергии. Для подвода сварочного тока к деталям служит вторичный контур.

Сварочный трансформатор, предназначенный для получения больших токов (до 300 А) при пониженном (0,2–25 В) напряжении, включается в сеть или к аккумулятору энергии контактором; в низкочастотных машинах трансформатор подключается к трехфазному или шестифазному выпрямителю.

Вторичное напряжение (сварочный ток) регулируют путем изменения коэффициента трансформации трансформатора (ступенчатое регулирование) с помощью секционного переключателя ступеней, или путем фазового регулирования (плавное регулирование), или тем и другим (смешанное регулирование).

Фазовое регулирование сварочного тока осуществляется аппаратурой управления. Этой же аппаратурой обеспечивается включение и выключение контактора или выпрямителей, заданная последовательность и продолжительность всех или части операций сварочного цикла и др.

3.6.1. Однофазные машины переменного тока

Электрическая схема машины приведена на рис. 3.14, *а*. Сварочный трансформатор *СТр* включается в сеть контактором. Вторичное напряжение U_{20} трансформатора устанавливают пере-

ключателем ступеней *ПС*. Значение и форма импульса сварочного тока зависят от типа контактора *К* (электромагнитный или вентильный) и настройки аппаратуры управления *АУ*.

Мгновенное значение напряжения u_1 и тока $i_1=i'_{св}$ ($i'_{св}$ – приведенный сварочный ток) в установившемся режиме имеют синусоидальную форму (рис. 3.14, *б*). Так как машин контактной сварки представляет собой для источника энергии активно-индуктивную нагрузку, ток $i'_{св}$ отстает от напряжения u_1 по фазе на угол φ. Сила сварочного тока $I_{св}$ определяется по выражению (3.5).

Значение $I_{св}$ можно изменять ступенчато переключателем *ПС*. При наличии в *АУ* машины фазорегулирования обеспечивается плавное регулирование $I_{св}$ за счет изменения угла α включения контактора *К*. Изменяя угол α при протекании сварочного тока, получают импульсы с плавным изменением амплитуды (рис. 3.14, *в*).

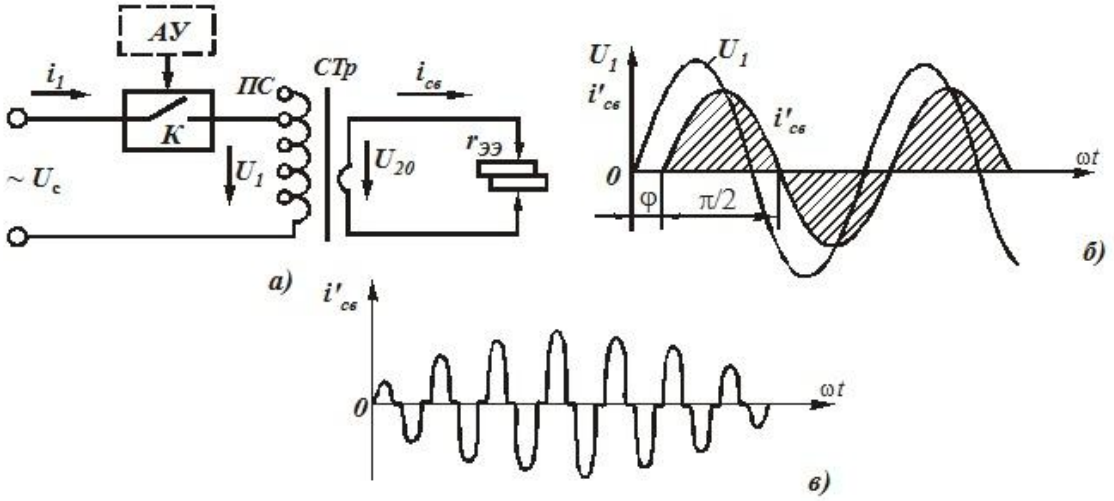


Рис. 3.14. Однофазная машина переменного тока:
а – электрическая схема; *б* – временные диаграммы напряжения и тока;
в – форма импульса сварочного тока при модулировании

Преимущества данной схемы: простота преобразования энергии сети и широкие возможности и регулирования длительности и значения сварочного тока. К недостаткам относят неравномерную загрузку фаз силовой сети, большие импульсы тока при включении машины большой мощности, низкий коэффициент мощности ($\cos\varphi$) [5, 13].

3.6.2. Трехфазные низкочастотные машины

На рис. 3.15, *а* приведена электрическая схема низкочастотной машины, а на рис. 3.15, *б* ее упрощенная схема замещения. В этой схеме к сварочному трансформатору *СТр* подводится выпрямленной напряжение U_d (рис. 3.15, *в*) от трехфазного выпрямителя *ВС*, собранного по мостовой схеме.

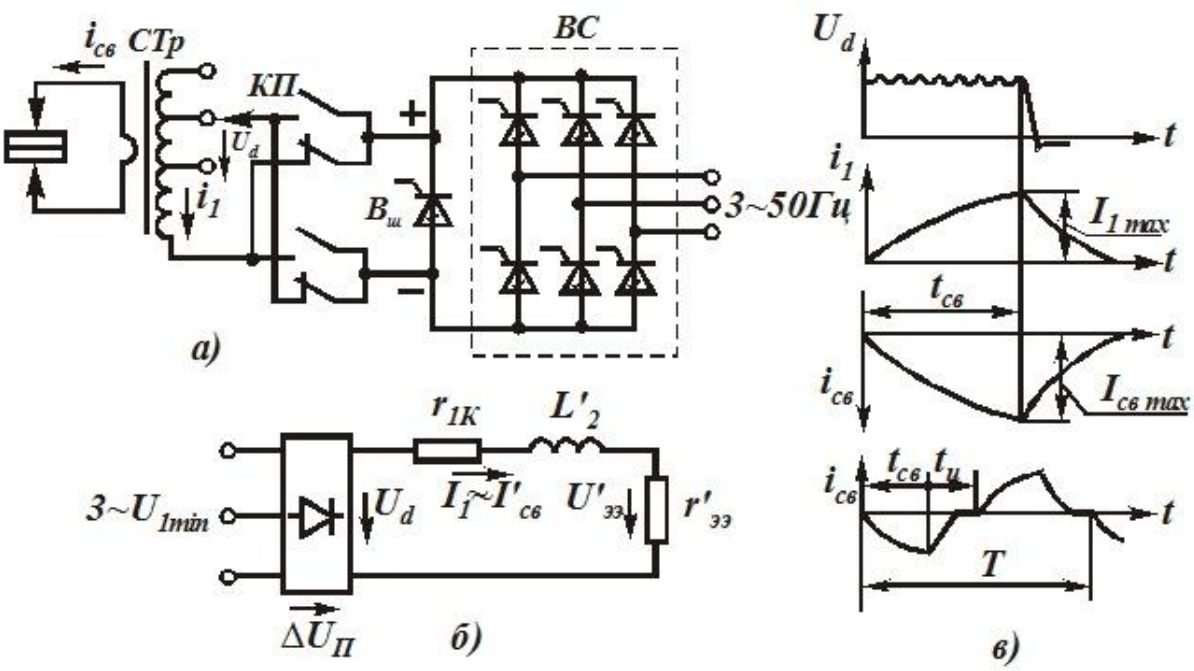


Рис. 3.15. Трехфазная низкочастотная машина:
а – электрическая схема; *б* – упрощенная схема замещения;
в – временные диаграммы напряжения U_d и токов i_1 и $i_{св}$

Ток i_1 в цепи возрастает по экспоненциальному закону (рис. 3.15, *в*). Максимальное значение первичного тока I_{1max} зависит от времени включения($t_{св}$) выпрямителя. Для этой схемы продолжительность включения выпрямителя ограничивают из-за насыщения стали магнитопровода и резкого увеличения первичного тока.

Для размагничивания стали полярность напряжения U_d чередуется коммутатором полярности *КП* (рис. 3.15, *а),* который срабатывает во время пауз между сварками. В мощных шовных машинах, а также в точечной машине МТН-6301 полярность напряжения изменяется поочередным включением двух отдельных выпрямителей, включенных на выходе встречно-параллельно.

Максимальная продолжительность t_{max} включения выпрямителя ограничивают 0,2÷0,4 с.

Практически токи i_1 и $i_{св}$ есть токи переходного процесса, возникающие при включении и выключении выпрямителя, изменяющиеся по экспоненциальному закону и имеющие плавное нарастание и спад. Для предотвращения переходных процессов между трансформатором и выпрямителем во время его выключения служит вентиль $B_ш$ (рис. 3.15, *а*), включенный таким образом, что он открывается после изменения полярности напряжения U_d, благодаря чему токи i_1 и $i_{св}$ быстро спадают до нуля.

В некоторых случаях, например, в машине МТН-6301 и шовных машинах, для ускорения спада тока выпрямитель переводят в инверторный режим, при котором напряжение U_d на первичной обмотке трансформатора изменяет свой знак, и энергия, накопленная в сварочной машине, частично возвращается в сеть. Быстрый спад тока $i_{св}$ необходим для сварки деталей большой толщины, осуществляемой несколькими (два – шесть) импульсами тока низкой частоты (1–2 Гц). После окончания работы одного выпрямителя и регулируемого интервала $t_и$ (рис. 3.15, *б*) включается второй выпрямитель, затем после спада тока включается первый и т. д. Период изменения тока T=0,3÷1 с.

Значение $I_{св}$ можно изменять ступенчато переключателем *ПС* и за счет изменения угла α включения контактора *К*.

Эта схема получения сварочного тока имеет ряд преимуществ, особенно важных при сварке легких сплавов: благоприятная технологическая форма импульса сварочного тока – его плавное нарастание и спад; равномерная загрузка трехфазной сети без пика в момент включения мощных машин (иногда до 1000 кВа). При относительно медленном нарастании тока, соответствующем частоте f = 1÷2 Гц, индуктивное сопротивление, вторичного контура $x_{в.к.}=2\pi f L_{в.к.}$ мало, где $L_{в.к.}$ – индуктивность вторичного контура. Поэтому низкочастотные машины с большим контуром, необходимым для сварки крупных узлов, имеют высокий $cos\varphi$ и умеренную потребляемую из сети мощность (по сравнению с однофазными машинами переменного тока). К недостаткам этой схемы следует отнести большие размеры и массу сварочного трансформатора и ограниченное время включения выпрямителя.

3.6.3. Трехфазные машины с выпрямлением тока во вторичном контуре машины постоянного тока

В машинах, выпускаемых в нашей стране, использована схема трехфазного нулевого выпрямителя с однотактным вентильным управлением на первичной стороне трансформатора. Такие машины позволяют получить длительные (всегда одной полярности) импульсы сварочного тока (практически постоянного тока). Однако понижающий трехфазный трансформатор *СТр* (рис. 3.16, *а*) переменного тока рассчитан на частоту 50 Гц. Поэтому его размеры значительно меньше размеров трансформатора низкочастотных машин той же мощности.

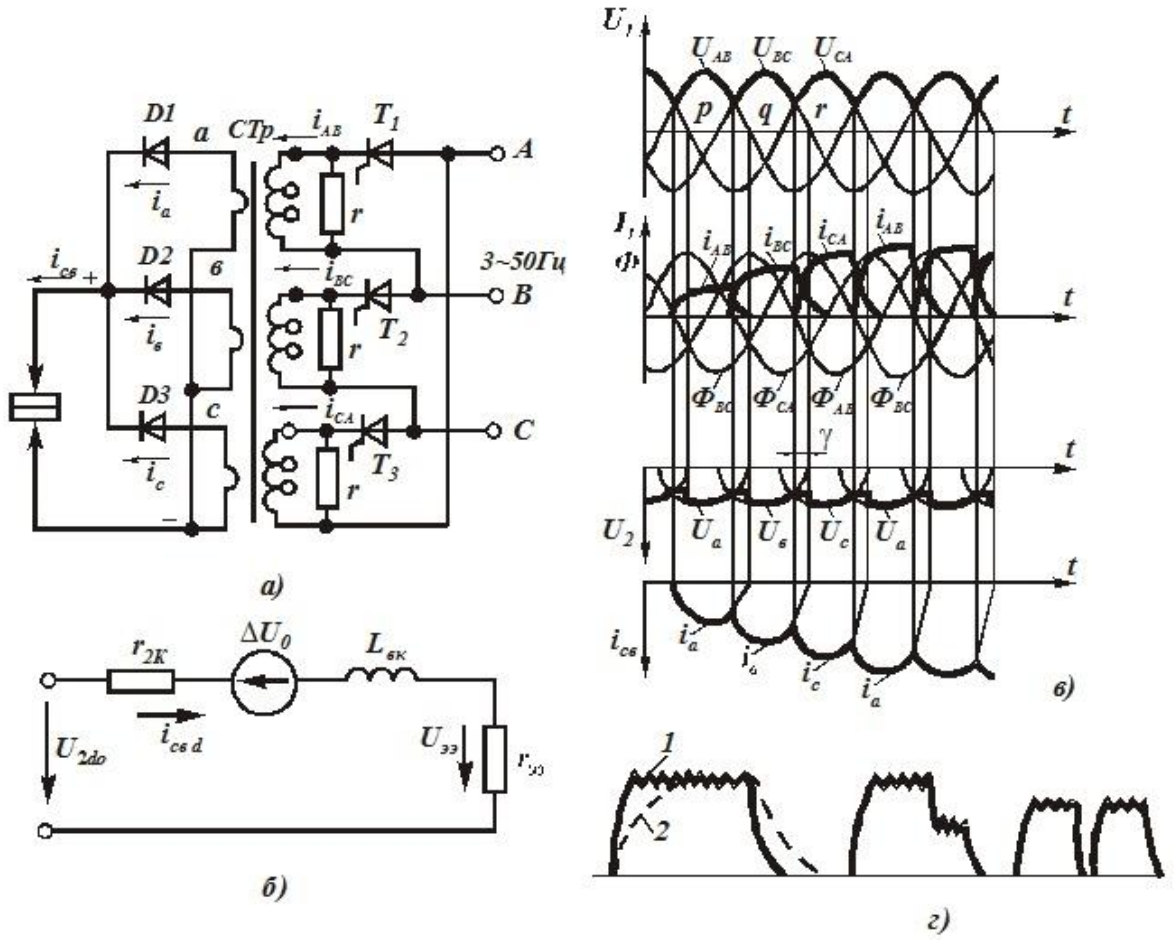


Рис. 3.16. Трехфазная машина постоянного тока:
а – электрическая схема; *б* – упрощенная схема замещения; в – временные диаграммы напряжения и токов выпрямителя; *г* – формы импульсов сварочного тока (*1* – с модуляцией, *2* – без модуляции)

Первичная обмотка трехстержневого трансформатора соединена треугольником с включением в каждую фазу по одному управляемому вентилю (*T1–T3*). Вторичная обмотка соединена звездой включением в каждую фазу по одному неуправляемому вентильному блоку (*D1–D2*), содержащему кремниевые неуправляемые вентили типа ВВ2-1250 с водяным охлаждением.

При включении управляемых вентилей в моменты времени *p*, *q* и *r* (рис. 3.16, *в*) к соответствующим фазам первичной обмотки подводятся полуволны линейных напряжений сети (u_{AB}, u_{BC} и u_{CA}), которые трансформируются во вторичные обмотки (u_a, u_b и u_c) и через неуправляемые вентили (*D1*, *D2* и *D3*) подводятся к вторичному контуру машины. В интервале *p–q* в проводящем состоянии находятся вентили *T1* и *D1*, через которые проходят токи i_{AB} и i_a соответственно. Начиная с момента *q* потенциал фазы *B* становится выше потенциала фазы *A,* и анод вентиля *T2* окажется под положительным напряжением относительно катода. Если в момент *q* на вентиль *T2* поступит отпирающий импульс, он включается, а вентиль *T1* выключается (при мгновенной коммутации), так как к нему оказывается приложенным запирающее напряжение, и т. д.

Несмотря на униполярный характер первичных фаз токов (i_{AB}, i_{BC} и i_{CA}). магнитопровод трехфазного трансформатора перемагничивается за период напряжения сети. Это связано с тем, что изменения магнитных потоков Φ_{AB}, Φ_{BC} и Φ_{CA} в каждом стержне магнитопровода при работе «своей» фазы и поочередной работе двух других фаз противоположны по знаку. Благодаря соединению первичных обмоток в треугольник и наличию вентилей не только во вторичной, но и в первичной цепи, размагничивание, например стержня фазы *AB,* происходит магнитодвижущими силами обмоток, расположенных на двух других стержнях, ко времени очередного включения вентиля *T1*.

Для обеспечения запирания управляемого вентиля раньше спада намагничивающего тока до нуля параллельно первичной обмотке каждой фазы включается шунтирующее сопротивление *r* (рис. 3.16, *а)*.

При включении выпрямителя сварочный ток нарастает от нуля до установившегося значения по экспоненциальному закону.

После выключения выпрямителя сварочный ток быстро спадает до нуля. При этом возможно повторное включение выпрямителя. В зависимости от паузы, а также угла управления вентилей импульсы тока имеют различную форму (рис. 3.16, *г*).

Действующее значение сварочного тока $I_{св}$ незначительно отличается от среднего значения $I_{св\ d}$. Так, при вылете машины 1,5 м и сварке деталей из легких сплавов для установившегося тока $I_{св}/I_{св\ d}$=1,02

Фактический коэффициент мощности машины с выпрямлением тока во вторичном контуре приближенно равен 0,8.

Преимущества электрических машин с выпрямлением тока во вторичном контуре: равномерная загрузка фаз; возможность регулирования формы и длительности импульса сварочного тока, а также получения многоимпульсного режима; по сравнению с однофазными машинами значительно меньшая потребляемая мощность, особенно при больших вылетах и при сварке изделий из легких сплавов; незначительное влияние вносимых во вторичный контур ферромагнитных масс на значение сварочного тока. Недостатки этой схемы получения сварочного тока: наличие вентильного блока, через который проходит большой сварочный ток, и падение напряжения на этом блоке, равное почти половине вторичного напряжения трансформатора [5, 13].

Рациональная область их применения: для сварки деталей с размерами, требующими больших вылетов и растворов.

3.6.4. Машины с аккумулированием (накоплением) энергии

В этих машинах происходит медленное аккумулирование энергии с потреблением небольшой мощности из сети и кратковременное использование ее во время сварки.

Аккумулировать энергию, достаточную для получения необходимых сварочных токов, можно в конденсаторах, магнитопроводах трансформаторов, во вращающихся массах, электрохимических аккумуляторах и специальных униполярных электрических генераторах. В настоящее время нашла промышленное применение лишь схема с накоплением энергии в конденсаторах. Электрическая схема конденсаторной машины состоит из двух частей: зарядной, обеспечивающей зарядку конденсаторной бата-

реи до заданного уровня напряжения зарядки, и разрядной, обеспечивающей разрядку конденсаторной батареи на свариваемое изделие с заданным сварочным током.

Одна из распространенных электрических схем конденсаторных машин приведена на рис. 3.17, *а*. В этой схеме батарея конденсаторов емкостью *С* заряжается от сети переменного тока через управляемый выпрямитель *ВС* (однофазный или трехфазный в зависимости от необходимой мощности) и зарядное сопротивление $r_з$. При переключении переключателя *П* зарядка конденсаторов прекращается и они разряжаются через первичную обмотку сварочного трансформатора *СТр*. Для предотвращения намагничивания сварочного трансформатора при сварке однополярными импульсами тока в схеме предусмотрен коммутатор полярности *КП*.

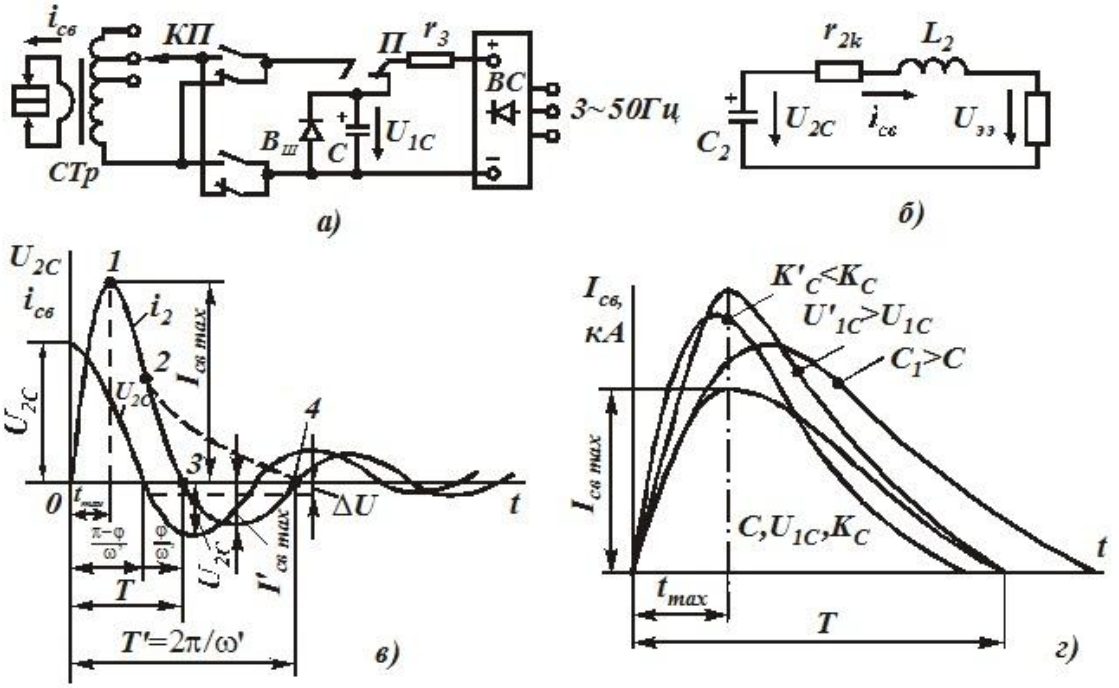


Рис. 3.17. Машина с накоплением энергии в конденсаторах:
а – электрическая схема; *б* – упрощенная схема замещения разрядной цепи, приведенной к вторичному контуру; *в* – графики тока и напряжения при разряде конденсаторов; *г* – графики токов короткого замыкания конденсаторной машины при изменении исходных параметров C, U_{1C} и K_C

Сварка изделия осуществляется благодаря разряду конденсаторной батареи. Импульс разрядного тока и, следовательно, им-

пульс сварочного тока определяются параметрами машины, рабочим напряжением U_{1C} и емкостью C батареи конденсаторов, а также коэффициентом трансформации K_C трансформатора *СТр.* Упрощенная схема замещения разрядной цепи конденсаторной машины дана на рис. 3.17, *б.*

В большинстве конденсаторных машин $r_2<2\sqrt{L_2C_2}$, поэтому разряд носит колебательный характер ($C_2 = K_C^2 \cdot C$ – приведенная к вторичному контуру емкость батареи конденсаторов; $r_2=r_{ээ}+r_{2k}$ и L_2 – сопротивление и индуктивность разрядной цепи).

Для сварки используется лишь первый полупериод колебательного разряда с временем, в течение которого концентрированно отдается основная часть аккумулированной энергии. При этом в начале разрядки энергия *Wc* конденсаторов тратится на тепловыделение и аккумулирование энергии в магнитном поле сварочной машины. К моменту, когда ток станет максимальным (точка *1,* рис. 3.17, *в),* конденсаторы разряжаются настолько, что не могут поддерживать ток $i_{св}$ во вторичном контуре, и в дальнейшем он уменьшается. Когда напряжение становится равным u_{2C} нулю, ток $i_{св}$ поддерживается только за счет расходования магнитной энергии (участок *2–3),* причем часть этой энергии идет на перезарядку конденсаторов. Когда ток снизится до нуля (точка 3), напряжение на конденсаторах достигнет вторичного максимума. Далее процесс повторится с той же частотой, но с меньшей амплитудой до полного затухания.

Для получения апериодического заряда ($r_2<2\sqrt{L_2C_2}$), более эффективного для сварки, в схему вводят шунтирующий вентиль $B_ш$ (рис. 3.17, *а*), который открывается при изменении знака напряжения u_{2C}, и переходный процесс имеет апериодический характер (штриховая линия *2–4;* рис. 3.17, *в*). Ток $i_{св}$ поддерживается в цепи аккумулированной магнитной энергией, которая преобразуется в тепловую во вторичном контуре и магнитопроводе трансформатора. Обратное напряжение на конденсаторах незначительно и равно падению напряжения ΔU на вентиле $B_ш$.

Значение сварочного тока и форма его импульса зависят как от соотношения параметров r_2 и L_2 машины, так и от емкости C

батареи конденсаторов, зарядного напряжения на ней U_{1C}, коэффициента трансформации K_C.

Графики токов короткого замыкания машины, характеризующие влияние изменения параметров C, U_{1C} и K_C на форму импульса сварочного тока, даны на рис. 3.17, *г*. При увеличении зарядного напряжения U_{1C} в основном увеличивается $I_{2k\max}$ (пропорционально U_{1C}), незначительно возрастает общая длительность T импульса и практически не изменяется длительность нарастания тока t_{max}. При снижении коэффициента *Кс* увеличивается $I_{2k\max}$ и снижаются t_{max} и T. Изменение длительностей t_{max} и T происходит примерно пропорционально изменению коэффициента *Кс*. При увеличении емкости C увеличиваются максимальное значение тока, его длительности t_{max} и T.

В отдельных случаях для повышения энергетических показателей машин применяют более сложные схемы зарядно-разрядных цепей: с накопительной емкостью; с использованием сварочного трансформатора с выводом средней точки первичной обмотки и др. Форма импульса тока в процессе сварки, как правило, не регулируется. Относительно крутой фронт нарастания импульса сварочного тока (t_{max} = 0,004÷0,05 с) иногда вызывает выплески металла. Во избежание выплесков, применяют повышенные усилия сжатия деталей, а также проводят более тщательную подготовку поверхностей деталей под сварку. При сварке ответственных деталей в конденсаторных машинах предусматривают возможность получения требуемых по технологическим соображениям форм импульсов сварочного тока. Для этой цели в разрядную цепь включают реактивную катушку со стальным магнитопроводом, имеющим небольшой зазор. Вначале, пока магнитопровод катушки не насыщен, скорость нарастания тока невелика. После насыщения магнитопровода влияние реактивной катушки на процесс разряда становится небольшим [5, 13].

В другом случае в зарядную цепь включают несколько конденсаторов, имеющих разную емкость и зарядное напряжение. Подключая их с определенным интервалом друг за другом, можно получить требуемую форму импульса тока. Однако эти схемы не получили широкого распространения. В общем случае свароч-

ный ток и форму импульса регулируют изменением параметров U_{1C}, C и K_C.

Емкость батареи и коэффициент трансформации – величины постоянные при данной настройке машины; напряжение батареи стабилизируется аппаратурой управления с высокой точностью. Поэтому импульсы сварочного тока отличаются высокой стабильностью, что при прочих равных условиях обусловливает стабильную повторяемость показателей качества свариваемых изделий.

Конденсаторные машины весьма широко используют для точечной и шовной сварки деталей малых толщин, для герметизации контактной сваркой корпусов интегральных микросхем, полупроводниковых приборов и др., а также для сварки деталей из легких сплавов. Для сварки очень тонких деталей применяют машины, в которых разряд конденсаторов осуществляется непосредственно на свариваемые детали без сварочного трансформатора (бестрансформаторная конденсаторная сварка сопротивлением) или сближающиеся детали (ударно-конденсаторная сварка встык и в притык проводов с диаметром до 2 мм).

3.7. Назначение и характеристика основных элементов электрической части машин и аппаратуры управления

3.7.1. Сварочные трансформаторы

Сварочный трансформатор встраивают в машину как элемент ее конструкции. Первичную обмотку трансформатора включают к источнику энергии, а к колодкам вторичного витка крепятся элементы вторичного контура, электрическое сопротивление которого обычно значительно больше полного сопротивления короткого замыкания трансформатора. Поэтому многие энергетические параметры всей машины определяются не столько параметрами трансформатора, сколько размерами вторичного контура и конструкцией включающих трансформатор в сеть устройств (контакторов, выпрямителей). Несмотря на это, непрерывно совершенствуют методы расчета и технологию изготовления сварочных трансформаторов, чтобы они имели высокие энергетические и экономические показатели.

Отличительная особенность сварочного трансформатора для машин контактной сварки – наличие одного (реже двух) вторичного витка, что достаточно для получения вторичной ЭДС E_2 = 1÷12 В (до 25 В при двух витках), обеспечивающей необходимые сварочные токи (обычно 2–80 кА, иногда до 300 кА) при относительно небольшом сопротивлении машины Z_{2k} (от десятков до сотен микроом).

Сварочный трансформатор состоит из трех основных узлов: магнитопровода, первичной и вторичной обмоток. Применяют магни-топроводы трех типов: стержневые, броневые и кольцевые. Магнитопровод стержневого типа прост в изготовлении, однако из-за больших потоков рассеяния и трудностей механического крепления обмоток они выходят из употребления. Наибольшее распространение получили броневые магнитопроводы, обеспечивающие некоторую экономию стали, уменьшение потоков рассеяния и, главное, обеспечивающие более надежное закрепление обмоток относительно магнитопровода.

Первичные обмотки выполняют двух типов: цилиндрические и дисковые. Цилиндрическую обмотку, состоящую из одной или двух катушек, расположенных на стержнях магнитопровода, применяют обычно в трансформаторах стержневого типа малых мощностей (до 25 кВа включительно) с небольшим числом ступеней, а следовательно, выводов. Катушку наматывают из изолированного обмоточного провода, имеющего круглое или прямоугольное сечение, в несколько рядов по высоте и несколько слоев по ширине.

Дисковая обмотка разделана на несколько (4–16) последовательно или последовательно-параллельно соединенных дисковых катушек, чередующихся с элементами вторичного витка, чем достигается их малое расстояние между собой и магнитопроводом. Это уменьшает потоки рассеяния трансформатора. Улучшается охлаждение первичной обмотки за счет теплоотвода в диски вторичного витка, обычно охлаждаемых водой. Наконец, при дисковой обмотке облегчается ремонт, так как при повреждении отдельной катушки ее заменяют без общей перемотки трансформатора.

Выбор конструкции вторичного витка определяется типом магни-топровода и первичной обмотки, а также условиями охлаждения (воздушное или водяное). При цилиндрической первичной обмотке вторичный виток делают гибким, набранным из фольги, толщиной 0,2–0,4 мм; концы его часто соединяют непосредственно с подвижными элементами вторичного контура машины. По ряду причин, изложенных выше, применение цилиндрических обмоток в трансформаторах машин контактной сварки ограничено.

В современных трансформаторах с дисковой первичной обмоткой вторичный виток изготовляют из двух и более плоских дисковых элементов, соединенных параллельно. Эти элементы штампуют из листовой меди. По периметру к ним припаивают трубки водяного охлаждения, а по концам – колодки для крепления шин вторичного контура.

В магнитопроводе и обмотках включенного трансформатора возникают большие электромеханические силы. Поэтому магнитопровод стягивают болтами при помощи жестких рамок, а обмотки надежно расклинивают текстолитовыми пластинами и сжимают стяжными шпильками, изолированными бакелитовой бумагой. В собранном трансформаторе первичные катушки изолируют от вторичных дисков прокладками гетинакса или слюдинита, а от магнитопровода – электрокартоном, слюдой или ее заменителями. В последних конструкциях трансформаторов готовый блок обмоток заливают эпоксидным компаундом [5, 13].

3.7.2. Контакторы

Устанавливаемый в первичной обмотке сварочного трансформатора контактор служит для включения и выключения первичного тока трансформатора.

В зависимости от назначения машины и требуемой надежности получаемых сварных соединений применяют электромагнитные или вентильные (преимущественно тиристорные или игнитронные) контакторы.

Электромагнитный контактор (рис. 3.18, *а*) представляет собой электромагнит, к которому притягивается якорь с укрепленными на нем подвижными контактами *1* в момент подачи тока в

катушку *2* от блока управления током *БУТ*. При этом замыкается электрическая цепь машины и подается напряжение к первичной обмотке трансформатора *СТр*. При отключении катушки *2* якорь с подвижными контактами *1* быстро возвращается в исходное положение пружинами.

Электромагнитные контакторы на большую разрывную мощность имеют значительные размеры, малый срок службы из-за образования дуги при выключении и низкое число включений в минуту (5–8). Кроме того, обладая большим и недостаточно стабильным временем отпускания, они не способны пропускать строго дозированные порции энергии, что приводит к нестабильности качества соединений, особенно при сварке на жестких режимах. Поэтому в настоящее время электромагнитные контакторы обычно используют в машинах стыковой сварки, трубных станах и шовных машинах малой мощности.

При использовании электромагнитного контактора включение сварочного трансформатора в сеть происходит в любой момент времени по отношению к фазе питающего напряжения, т. е. асинхронно.

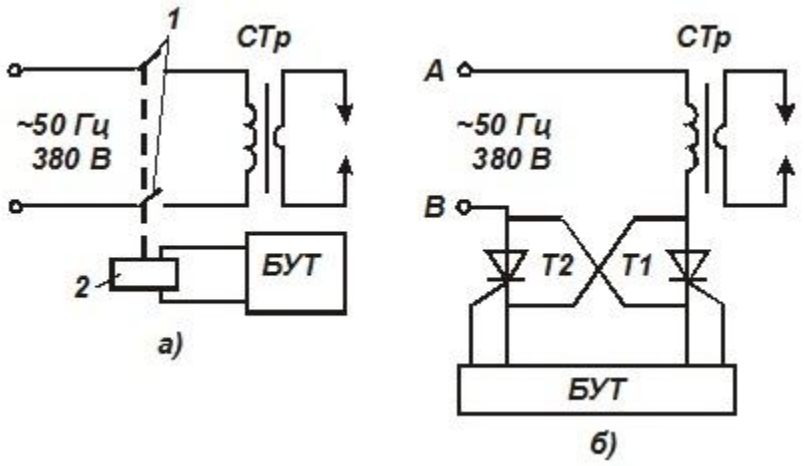


Рис. 3.18. Схемы контакторов:
а – электромагнитный; *б* – тиристорный

В подавляющем большинстве современных машин контактной сварки подключение сварочного трансформатора к электрической сети производится синхронно, т. е. в определенный момент по отношению к фазе питающего напряжения, с помощью тиристорных контакторов. Только в машинах большой мощности

(коммутируемые токи более 1500 А) применяют игнитронные контакторы; при этом в цепях поджигания игнитронов устанавливают тиристоры без принудительного охлаждения.

Игнитронный контактор основан на игнитронах, представляющих собой трехэлектродный управляемый ионный прибор с ртутным катодом. Игнитроны мало чувствительны к перегрузкам, однако длительности их работы обычно ограничивается стойкостью поджигателя (третий электрод, включающий вентель) и составляет 1000 часов и более. Игнитронные контакторы имеют большие габариты и устанавливаются только в вертикальном положении, для них характерно ненадежное поджигание и низкий КПД.

Основа тиристорного контактора – тиристор – характеризуется долговечностью (до 12000 ч), малыми размерами, Высоким КПД (падение напряжения на тиристоре 3–4 В) и высокой надежностью в эксплуатации, его можно устанавливать в различных пространственных положениях. Тиристор чувствителен к перенапряжению и требует соответствующей защиты.

Тиристорный контактор (рис. 3.18, *б*) состоит из двух тиристоров *Т1* и *Т2,* включенных встречно-параллельно. Анод каждого вентиля соединен с катодом другого вентиля и вся эта группа включена последовательно с первичной обмоткой трансформатора *СТр.* Если полярность полуволны переменного напряжения такова, что напряжение линии *А* положительно относительно линии *В,* то проводить ток будет (при наличии управляющего сигнала) вентиль *Т1*. При обратной полярности проводящим окажется вентиль *Т2.*

Промышленность выпускает тиристорные контакторы (работающие при напряжении сети 220 и 380 В) типа КТ-1, КТ-03, КТ-04, КТ-07, КТ-11 и КТ-12, отличающиеся по величине номинального тока (при ПВ 20 % и времени непрерывной работы не более 0,5 с) соответственно 250, 850, 1400, 480, 1000 и 1750 А. Контакторы имеют водяное охлаждение, за исключением КТ-07, и контрольное устройство (биметаллическое термореле), ограничивающее повышение температуры выше 60 °С, а также варисторы для защиты от возможных перенапряжений. Примерный расход охлаждающей воды составляет около 2 л/мин. Напряжение импульса управления колеблется в пределах 15–30 В, а ток управления 0,4–2 А. Характер включения контакторов (асинхронное или синхронное) зависит от устройства системы управления БУТ.

3.7.3. Регуляторы цикла сварки

Регулятор предназначен для управления циклом сварки машины через функциональную аппаратуру: контактором, электропневмоклапанами, реле привода вращения роликов (непрерывное или шаговое вращение) или перемещения плиты и др. В зависимости от технологических требований (выбранных циклограмм работы машины) применяют однопрограммные и многопрограммные регуляторы времени. Число позиции регуляторов обычно 3–8. Регуляторы работают с использованием аналогового или дискретно-цифрового принципа [5, 13].

В однопрограммных регуляторах число позиций и порядок их выполнения (последовательность действия механизмов) всегда остаются без изменения. Регуляторы обеспечивают независимость регулировки длительности выдержек отдельных позиций.

В многопрограммных регуляторах можно (при соответствующей настройке) проводить сварочные циклы с различными вариантами изменения усилия на электродах или формы сварочного тока. Порядок следования интервалов и их число могут изменяться в зависимости от выбора программы. Отдельные позиции могут исключаться. Обычно в таком регуляторе имеется несколько параллельных ветвей управления, запускаемых от одной команды.

Принцип построения регуляторов зависит от циклограммы сварки. Любой регулятор состоит из n ячеек, соответствующих числу позиций, каждая из которых регулирует длительность одной операции и в конце ее вырабатывает сигнал на включение следующей операции. Высокая производительность машин контактной сварки требует передачи команд от ячейки к ячейке посредством бесконтактных элементов. Исполнительную – функциональную аппаратуру в большинстве машин контактной сварки также выполняют на бесконтактных элементах.

3.7.4. Регулирование сварочного тока

Одним из важных параметров режим контактной сварки является величина сварочного тока $I_{св}$. Значение $I_{св}$ в контактных машинах можно регулировать ступенчато и плавно.

Ступенчатое регулирование $I_{св}$ осуществляется за счет различного подключения числа витков первичной обмотки *СТр*, которая разделана на секции. Выводы от секций подключают к переключателю ступеней, где с помощью перемычек, ножей или рукояток осуществляют различные комбинации соединения секций для получения требуемого напряжения U_{20} и коэффициента трансформации $K_C = W_1/W_2$, где W_1 и W_2 – числа витков первичной и вторичной обмоток трансформатора; при наличии одного вторичного витка $W_2 = 1$, коэффициент K_C равен числу последовательно включенных витков W_1 первичной обмотки.

Схема изменения числа витков W_1 (напряжения U_{20}) по ступеням и переключатель обеспечивают надежность и безопасность в работе (напряжение между двумя любыми выводами первичной обмотки не превышает 1000 В); изменение U_{20} при переходе от ступени к ступени не более чем на 20 % – для машин группы А и машин группы Б без фазовой регулировки тока и 30 % – для машин группы Б с фазовой регулировкой; отношение предельных значений коэффициентов трансформации не менее 2 – для машин группы А; 1,4 – для машин группы Б с фазовой регулировкой и 1,8 – для машин группы Б без фазовой регулировки тока.

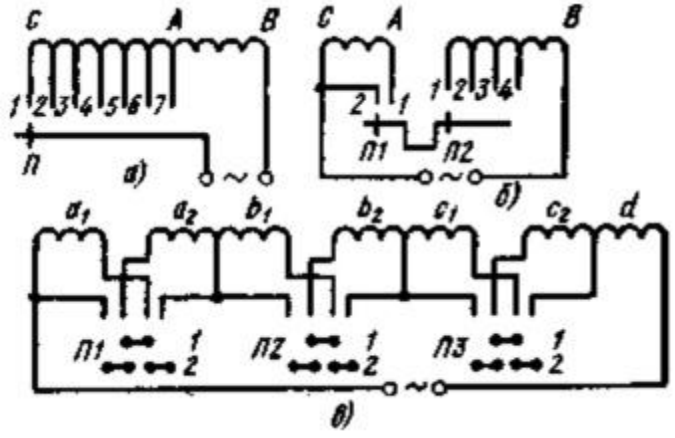


Рис. 3.19. Схемы регулирования вторичного напряжения трансформатора

Наиболее простая схема изменения числа витков W_1, применяемая для машин малой мощности, получается при секционировании первичной обмотки трансформатора и соединении ее ответвлений *1-7* (рис. 3.19, *а*) с клеммами секционного переключателя *П*. При включении на клемму *1* ток обтекает все витки; этому соответствует минимальное напряжение U_{20} (низшая ступень). При вклю-

чении на клемму 7 (высшая ступень) U_{20} наибольшее. При этом напряжение сети подводится к участку обмотки *AB,* а между концами Л и С, как в автотрансформаторе, появляется напряжение:

$$U_{AC}=U_C W_1/W_{1(AB)},$$

где W_1 – общее число витков первичной обмотки; $W_{1(AB)}$ – число витков в секции *AB*.

В схеме *б* (рис. 3.19) имеется два переключателя: *П1* и *П2*. При их установке в положение *1* первичная обмотка включена полностью. При установке ножа *П1* в положение *2* левая группа витков (секция *AC)* отключается. Если при этом переключатель *П2* установлен в положение *4* (высшая ступень), то включается минимальное число витков. При этом напряжение между точками А и В $U_{AB}<1{,}5U_C$, а коэффициент глубины регулирования $Kp=U_{20max}/U_{20min}\leq 3$. Эту схему применяют для машин средней мощности.

В машинах средней и большой мощности широко используется схема *в* (рис. 3.19). Для уменьшения потоков рассеяния, лучшего охлаждения и обеспечения параллельной работы катушки a_1 и a_2, b_1 и b_2, c_1 и c_2 расположены симметрично вокруг вторичных дисков. При положении *1* переключателей *П1–П3* витки всех катушек соединены последовательно, а при положении *2* витки катушек a_1 и a_2, b_1 и b_2, c_1 и c_2 соединены параллельно. В первом случае $W_1 = 2a + 2b + 2c$, во втором – $W_1 = a + b + c$. При других положениях переключателей часть витков катушек включается параллельно, другая – последовательно. При наличии только одних параллельно-последовательных групп $Kp = 2$.

Для переключения витков обмотки трансформатора используют переключатели пластинчатые, ножевые и барабанного типа.

При наличии в АУ машины блока фазорегулирования обеспечивается плавное регулирование $I_{св}$ за счет изменения угла α включения контактора *К*.

В вентильном контакторе *К* включение вентилей обычно осуществляется при углах управления $\alpha>\varphi$ (рис. 3.20), т.е. при определенном регулируемом смещении на угол α момента отпирания вентилей по отношению к фазе напряжения сети u_c.

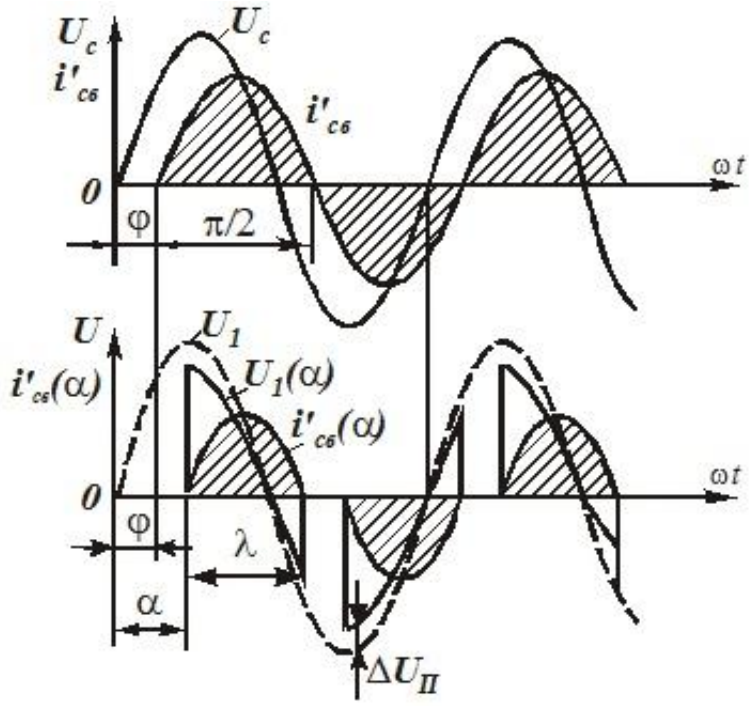


Рис. 3.20. Временные диаграммы напряжения u_c, $u_{1(\alpha)}$ и тока $i'_{св(\alpha)}$ при использовании вентильного контактора

При этом подводимое к трансформатору через контактор напряжение $u_{1(\alpha)}$ отличается от синусоидального сетевого напряжения u_c, и рабочий участок полуволны сетевого напряжения уменьшается ($\lambda<\pi/2$). В результате этого действующее значение напряжения, подводимого к трансформатору, а, следовательно, и ЭДС, индуктируемая во вторичной обмотке, будут меньше, что вызовет также уменьшение сварочного тока $i'_{св(\alpha)}$ (рис. 3.20).

Эти искажения форм напряжения $u_{1(\alpha)}$ и тока $i'_{св(\alpha)}$ приводят к появлению высших гармоник напряжения и тока, в результате чего увеличивается индуктивное x_{2k} сопротивление машины и снижается коэффициент мощности машины cos φ. Кроме этого, при использовании вентильного контактора имеет место падение напряжения ΔUn на открытом вентиле. Принимают ΔUn = 2÷5 В для тиристорного и ΔUn = 20÷35 В для игнитронного контактора.

Несмотря на большие возможности плавного (фазового) регулирования сварочного тока углом α, предел регулирования тока ограничивают от α = φ до α = φ + 50° (60°) по технологическим и энергетическим соображениям. При больших углах α имеются большие и частые перерывы в протекании сварочного

тока, в течение которых детали охлаждаются. С увеличением угла α коэффициент мощности резко снижается. Необходимый диапазон регулирования сварочного тока при углах $\alpha > \varphi + 60°$ рекомендуется перекрывать ступенчатым регулированием напряжения U_{20}.

3.8. Установка и наладка контактных машин

Контактная сварка отличается относительной безопасностью, и поэтому оборудование обычно располагают по ходу общего технологического процесса, например, в сборочных цехах. Лишь мощные стыковые машины, отличающиеся образованием большого количества брызг металла, в ряде случаев устанавливают в отдельном помещении. Для экономии площадей вспомогательное оборудование – пускатели, шкафы управления и т. д. – можно размещать на стенах, колоннах и т.д. При планировке рабочих мест для удобства обслуживания, ремонта и обеспечения безопасности необходимо предусмотреть определенные расстояния между машинами и другими элементами оборудования.

Сварочные машины можно устанавливать непосредственно на полу, без специальных фундаментов. При сварке крупногабаритных конструкций целесообразно поднимать машины на фундамент высотой 400–600 мм, а для сварщика предусмотреть соответствующие лестницы и мостики [5, 13].

Оборудование должно быть обеспечено электрическим питанием проводом определенного сечения. Мощные машины целесообразно подключать к отдельному трансформатору. Падение напряжения в подводимых кабелях не должно превышать 5 %. Для разгрузки питающей сети рекомендуется поочередное включение машин, осуществляемое общей системой управления.

Для улучшения cos φ оборудования иногда применяют компенсационные устройства – батареи конденсаторов, подключаемые параллельно сварочному трансформатору.

Оборудование подключается также к воздушной сети с давлением сжатого воздуха не ниже 0,6 МПа и к водяной сети с давлением не менее 0,15 МПа. Трубы должны иметь сечение, соответствующее паспортным данным. Для охлаждения желательно

применять очищенную от солей воду для уменьшения опасности засорения.

Под роликами шовных машин с наружным охлаждением устанавливается корыто или имеется яма, закрытая металлической решеткой, связанная с цеховой канализацией.

Прежде чем приступить к работе, необходимо ознакомиться с описанием и инструкцией по эксплуатации.

В процессе эксплуатации необходимо следить за оборудованием – состоянием вторичного контура путем измерения его сопротивления. Для машин переменного тока оно должно быть не более 20 % паспортных данных, для других машин – не более 10 %. Подвижные контакты периодически смазывают графитокасторовой смазкой. Рекомендуется также регулярно смазывать направляющие ползуны привода усилия, а в лубрикатор заливать касторовое или вазелиновое масло. Для смазывания редукторов привода вращения роликов применяют машинное масло; открытые передачи смазывают техническим вазелином или тавотом.

Надежная работа оборудования обеспечивается проведением в определенные сроки периодических осмотров и проверок оборудования, а также системой планово-предупредительного ремонта [5, 13].

4. МЕХАНИЗАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

4.1. Общая характеристика средств механизации и автоматизации

Большая часть времени при изготовлении сварных конструкций (до 70–80 %) затрачивается на вспомогательные операции. Сама операция сварки (получение соединения) практически полностью автоматизирована, а степень механизации вспомогательных операций не превышает в ряде случаев 10 %.

Уровень механизации и автоматизации определяется системой организации производства. В опытном и мелкосерийном производстве используют несложные сборочные приспособления, различные немеханизированные поддерживающие устройства. Для массового производства характерно применение специализированных машин, механизированных приспособлений, машин-автоматов и промышленных роботов. Сварочные машины, средства механизации и автоматизации располагают по ходу технологического процесса и организуют и механизированные поточные или автоматические линии [6].

Наивысшая степень автоматизации достигается на машинах, где все операции, в том числе заготовительные и контрольные, выполняются без участия человека. Специфика контактной сварки определяет следующие особенности конструирования средств механизации и автоматизации.

1. Детали устройств и приспособлений, вводимых в сварочный контур машины, рекомендуется изготовлять из немагнитных материалов – алюминиевых сплавов, немагнитных сталей и т. п.

2. Токоведущие элементы машины должны быть изолированы от приспособления во избежание шунтирования тока и повреждения (прожога) поверхности детали.

3. Узлы, предназначенные для точечной и шовной сварки, необходимо демпфировать для компенсации износа электродов и прогиба консолей, например, устанавливать на плавающие опоры, что дает возможность всегда располагать узел на нижнем электроде независимо от его длины (износа рабочей поверхности).

4. Вид приспособлений – переносные или стационарные,

определяется размерами и массой изделий.

5. Приспособления не должны затруднять свободный доступ к месту сварки.

6. Приспособления для стыковой сварки должны обладать достаточной жесткостью, обеспечивая тем самым соосность деталей при осадке.

В конструкции приспособлений рекомендуется использовать унифицированные узлы: редукторы, шаговые механизмы, сварочные головки, элементы пневмоэлектрической аппаратуры и т. п.

4.2. Основные средства механизации и автоматизации

Технология производства деталей с применением контактной сварки кроме основных сварочных операций включает вспомогательные операции, к которым относят подготовку поверхности, загрузку, сборку и съем деталей с приспособлений и машин, перемещение деталей при сварке, обработку сварных швов, правку и др [6].

На собственно сварочные операции приходится в среднем до 10–15 % общей трудоемкости изготовления изделия. При применении контактной сварки эффективно механизировать вспомогательные операции. Механизация и автоматизация определяется программой производства изделий.

При мелкосерийном производстве целесообразно применять преимущественно недорогие средства механизации, например универсальные сборочно-сварочные приспособления, немеханизированные поддерживающие устройства. Для крупносерийного и массового производства характерно применение высокомеханизированных приспособлений, оснащенных загрузочными устройствами, различных комбинированных и многоэлектродных машин, механизированных поддерживающих и перемещающих устройств, промышленных роботов. Все эти устройства в массовом производстве соединяют в поточные механизированные, или автоматические линии, в последних – все операции выполняются без участия человека [6].

4.3. Механизированные сборочно-сварочные приспособления

Механизированные приспособления всех типов характеризуются наличием зажимных устройств с пневматическим или гидравлическим групповым приводом. Для быстрого съема детали применяют выталкиватели, съемники или более сложные съемные устройства.

Механизированные приспособления обычно связаны с транспортными системами. Сборочно-сварочное приспособление (рис. 4.1) имеет три рабочих позиции. Две выдвижные тележки *1* и *4* загружаются деталями и разгружаются. Тележки относительно сборочно-сварочной позиции *5* имеют челночное движение. Для подачи и съема деталей служит спускной механизм *2,* который связан с толкающим конвейером *6.* Сварка; выполняется подвесными точечными машинами *3.*

Поддерживающие и перемещающие устройства применяют для передвижения свариваемой детали относительно электродов сварочной машины. Детали передвигают вручную или с помощью специальных механизмов. В некоторых случаях эти приспособления одновременно являются и сборочными. Их применение существенно облегчает условия труда и улучшает качество благодаря более точному расположению сварочных соединений и правильной ориентации детали относительно электродов сварочной машины.

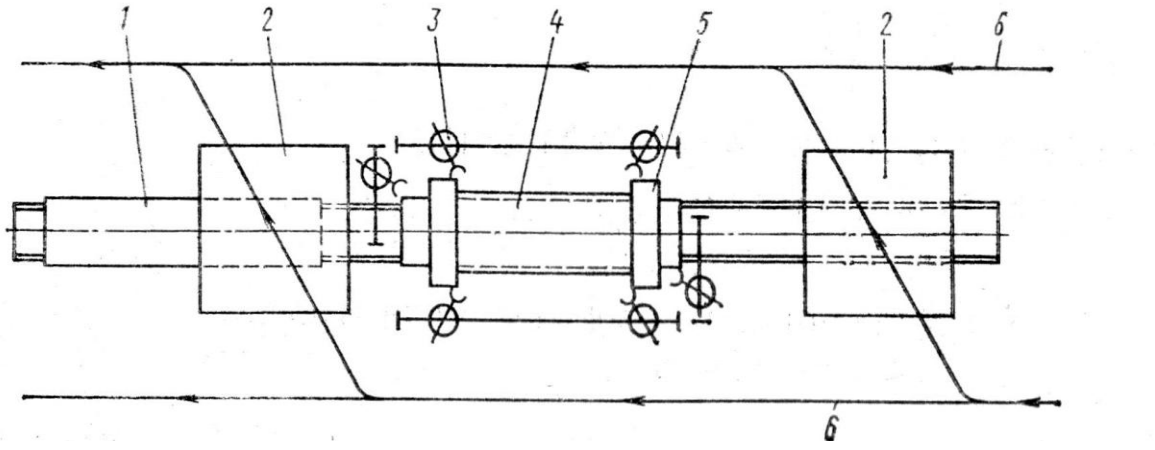


Рис. 4.1. Схема главного кондуктора для сборки и сварки кузовов легковых автомобилей ВАЗ

Простейшее механизированное поддерживающее приспособление для сварки крупногабаритных плоских панелей показано на рис. 4.2.

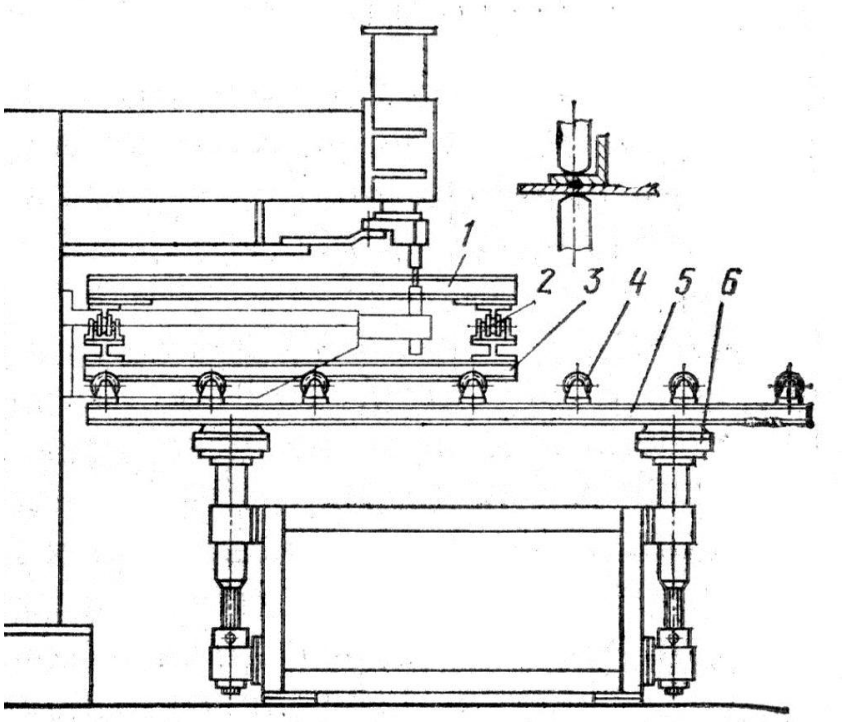


Рис. 4.2. Поддерживающее приспособление для точечной сварки

На подвижной раме *1* закрепляется свариваемая панель, которая может перемещаться по роликам *2* каретки *3* перпендикулярно к консолям сварочной машины. Каретка *3* перемещается вдоль консоли машины по роликам *4* стола *5*. Возможность перемещения в двух взаимно перпендикулярных направлениях позволяет производить сварку в любом месте детали. Стол связан с основанием приспособления через пневмодиафрагменные камеры 6, которые поднимают панель под нижним электродом в момент пауз между циклами сварки, что позволяет избежать трения деталей о поверхность электрода и предотвратить их преждевременное изнашивание. Движение рамы *1* с деталью на шаг между точками обычно выполняют вручную по разметке или путевым указателям [6].

На рис. 4.3 приведены два простых поддерживающих устройства для шовной сварки продольных и кольцевых швов. Детали фиксируются на опорных обрезиненных роликах, установленных на рамах и консолях. Положение их в пространстве регули-

руется. Деталь при сварке перемещают электродами машины. Эти приспособления можно использовать и для точечной сварки. Перемещают детали на шаг вручную.

Иногда фиксирующие и перемещающие приспособления не связывают жестко с машиной, а устанавливают их на специальных тележках. Это позволяет на одной и той же машине сваривать несколько деталей, применяя различные приспособления.

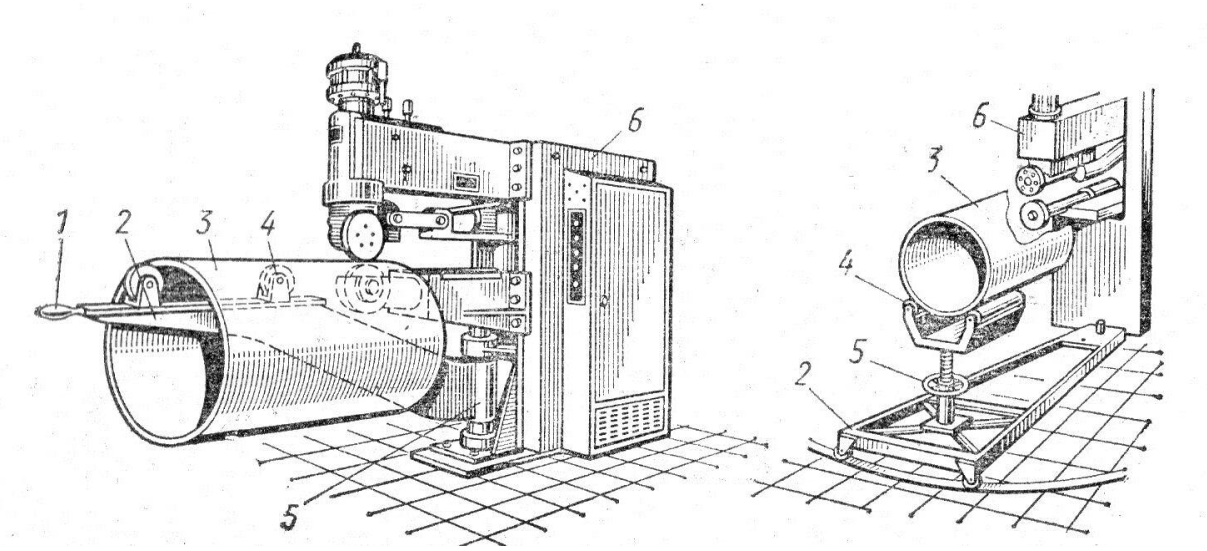


Рис. 4.3. Поддерживающее приспособление для шовной сварки:
1 – рычаг; *2* – рама; *3* – деталь; *4* – опорные ролики; 5 – механизм подъема; *6* – машина

Механизация одноточечной и рельефной сварки осуществляется применением различных механических устройств, перемещающих свариваемые детали относительно электродов сварочной машины. В качестве поворотных механизмов используют храповые, мальтийские и кулачково-цевочные механизмы.

В сборочных стапелях детали фиксируют и закрепляют в различных плоскостях (рис. 4.4). Стапель для сборки плоских или слегка изогнутых панелей состоит из массивной рамы *1*, шаблона 2, ложементов, укрепленных на шарнирах *5*. Детали – обшивку *3* с профилями *4* прижимают к ложементам рубильниками *6*, облицованными резиновыми прокладками и имеющими прорези в соответствии с числом и расположением профилей. Особенность этой конструкции – вертикальное расположение стапеля, обеспечивающее экономию производственных площадей и удобный под-

ход к приспособлению. Детали собирают на фиксаторах или с помощью прихваток пистолетом или клещами [6].

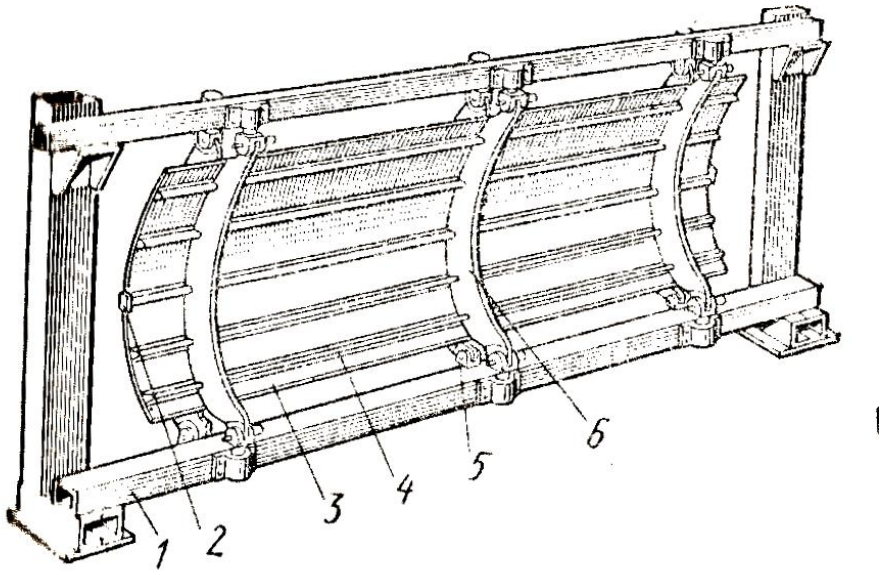


Рис. 4.4. Стапель для сборки панелей

Для сборки шпангоутов с обечайками используют устройства с механической подачей деталей (рис. 4.5).

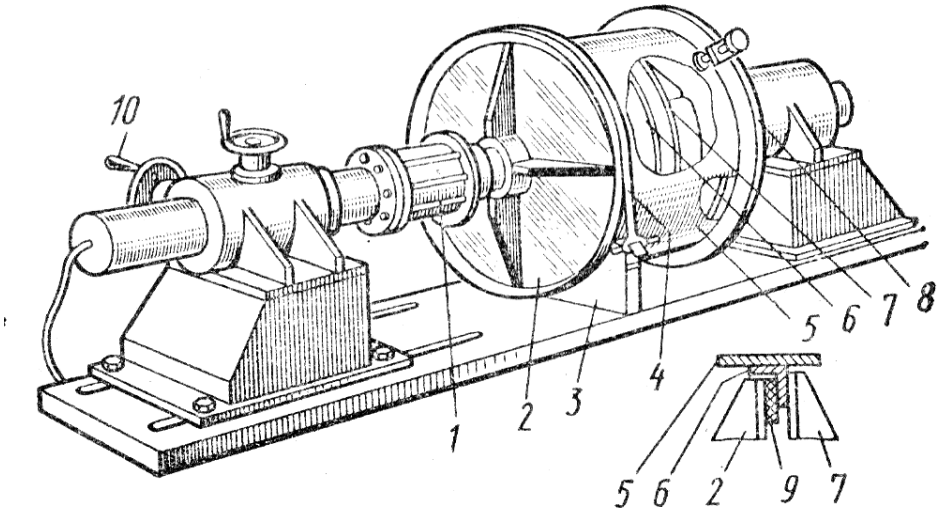


Рис. 4.5. Стапель для сборки обечаек со шпангоутами

На стапеле закрепляют пневмоцилиндр *1*, на штоке которого находится подвижная планшайба *2*. Обечайку *5* устанавливают на фиксатор неподвижной планшайбы *8*, на которой имеется упор 7. Дополнительно обечайку фиксируют гибкой стальной лентой *4*,

связанной с ложементом *3*. Па планшайбе *2* закрепляют шпангоут *6*, в камеру пневмоцилиндра подают воздух и передвигают шпангоут вместе со штоком до упора 7. Шпангоут закрепляют в обечайке, а шток возвращают в исходное положение. Упор *7* выдвигают, устанавливают другой шпангоут, который заводят в обечайку подобным образом. Положение пневмоцилиндра регулируют ходовыми винтами рукояткой *10*. Для избежания повреждения шпангоутов при сборке подвижная планшайба армирована резиновым кольцом *9*.

На рис. 4.6, *б* приведена кинематическая схема поворотного приспособления (механического оператора), применяемого на ГАЗе для точечной сварки колес легкового автомобиля. Приспособление смонтировано на универсальной точечной машине. Точечной сваркой сваривают диск с ободом в 12 точках, расположенных четырьмя группами по три точки в каждой группе (рис. 4.6, *а)*. Шаг между точками на каждой из спиц колеса и между спицами разный. Колесо поступает на сварку в собранном виде после запрессовки диска в обод. Колесо укладывается на фиксатор поворотного механизма (см. рис. 4.6, *б)* приспособления, после чего оператор нажимает пусковую кнопку и воздух подается в среднюю камеру *2*. Нижний поршень машины начинает рабочий ход. Это движение одновременно используется для поворота колеса на шаг, так как упор *3* при ходе вниз давит на толкатель *4*, который приводит в движение храповой механизм 5, вращающий поворотный механизм *1* через цилиндрические шестерни *6*. Во время поворота колеса на большой угол воздух подается через *ЭПКЗ* в цилиндры *9*, штоки которых поднимают приспособление на небольшую высоту, чтобы фланец диска при повороте не касался нижнего электрода. Во время поворота на малый угол большой подъем колеса не требуется, а необходимое расстояние между электродами и поверхностью диска обеспечивают пружины *8*. В положении сварки угол поворота колеса фиксируется пальцем 7, который входит в прорезь диска на главном валу приспособления.

При рельефной, а иногда и точечной сварке эффективно применение различного типа поворотных столов, позволяющих загружать детали вне сферы сварочных электродов во время рабочего цикла. Наиболее сложными узлами этих устройств являются механизмы для поворота стола, на котором обычно разме-

щается оснастка с изделием. Такие приспособления устанавливают на машинах общего применения

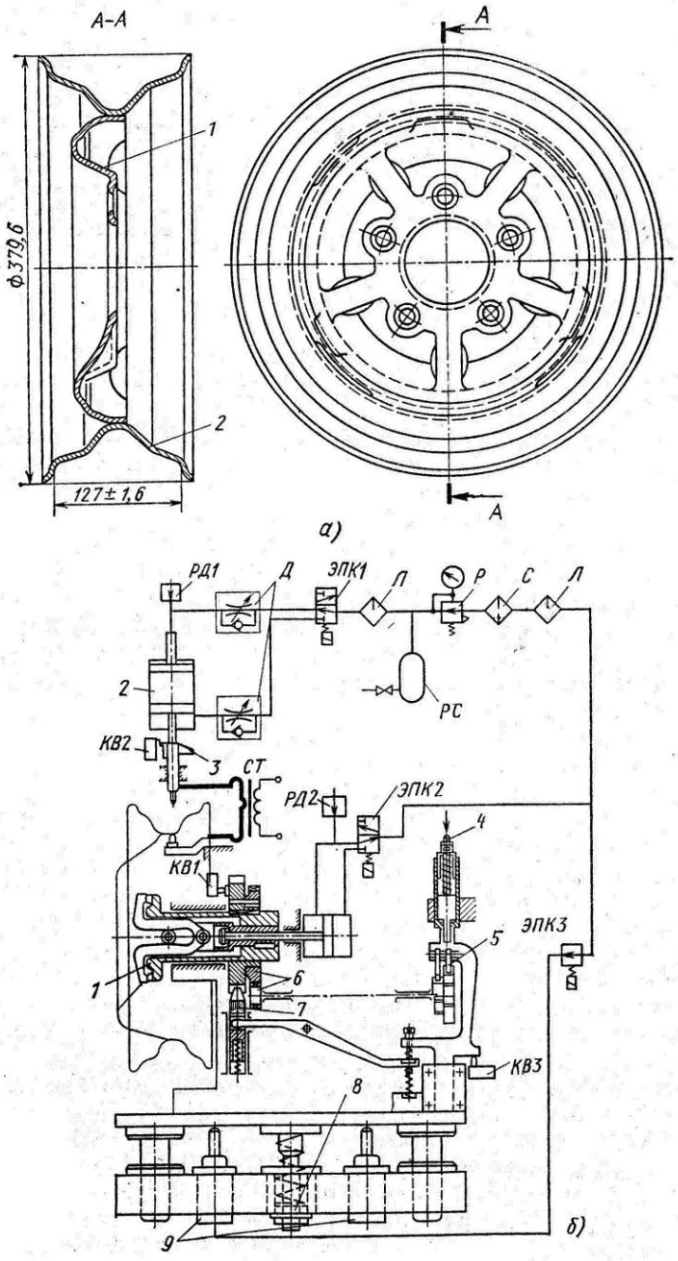


Рис. 4.6. Поворотное приспособление для точечной сварки колес легковых автомобилей:

а – колесо легкового автомобиля: *1* – диск; *2* – обод; *б* – кинематическая схема приспособления; *ЭПК1* – электропневматический клапан главного цилиндра машины; *ЭПК2* – электропневматический клапан зажимного устройства приспособления; *ЭПК3* – электропневматический клапан механизма подъема приспособления; *РД1, РД2* – реле давления; *КВ1> КВ2, КВ3* – концевые выключатели; *Л* – лубрикаторы, *Р* – регулятор давления; *РС* – ресивер; *О* – отстойник; Д – дросселирующие клапаны

Чаще используют поворотные столы G мальтийскими механизмами или кулачково-роликовые устройства с приводом от электрического двигателя. Они отличаются плавностью движения, точностью фиксации, надежностью и долговечностью.

В механизме первого типа (рис. 4.7, *а)* для прерывистого поворота стола *1*, на котором расположены электроды и изделия, служит кривошип (поводок) *4*, приводимый во вращение электродвигателем через червячный редуктор *3*. Палец кривошипа (цевка) *5* входит в прорезь креста *2* мальтийского механизма и поворачивает стола определенный угол в зависимости от числа прорезей в этом кресте и числа пальцев на кривошипе.

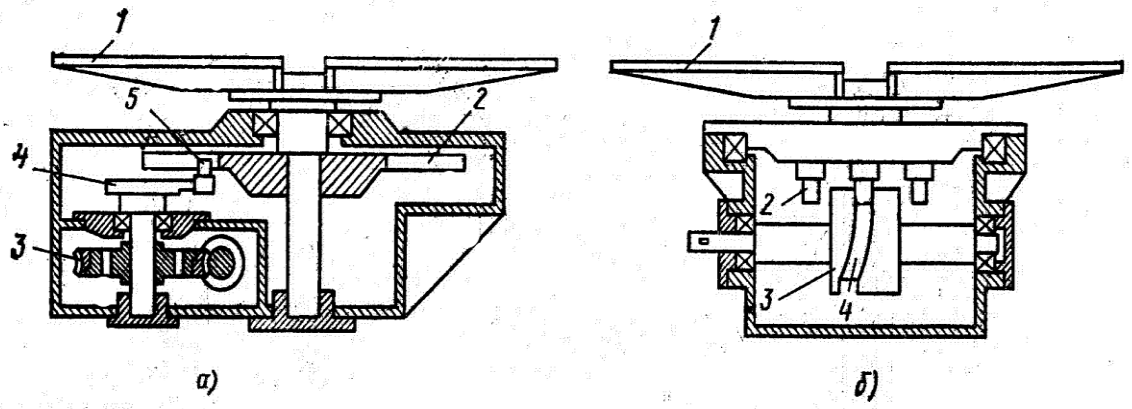


Рис. 4.7. Схемы поворотных столов к машинам для рельефной сварки

В кулачково-роликовых механизмах (рис. 4.7, *б)* стол приспособления *1* поворачивает цилиндрический кулачок (барабан) *3*. В кулачке имеется криволинейный паз *4*, в который входит ролик *2*, связанный с поворотным диском, на последнем закреплен стол. При повороте кулачка ролики диска перемещаются между образующими криволинейного паза *4* и поворачивают диск в результате давления на них стенок паза. Обычно часть паза расположена перпендикулярно к его оси. В этом случае при вращении кулачка стол не поворачивается, а фиксируется в определенном положении [6].

В этом механизме можно осуществить различные движения ведомого звена, целесообразное соотношение между этапами цикла. Стол достаточно точно фиксируется роликом, входящим в паз.

4.4. Комбинированные сварочные машины

В комбинированных машинах в одном агрегате объединено (интегрировано) несколько последовательных, различных го технологии операций, в результате исключены промежуточные операции, характерные для поточных и автоматических линий (транспортирование, загрузка и съем деталей после каждой операции и др.). Это позволило значительно сократить продолжительность и трудоемкость не только вспомогательных, но и основных технологических операций и снизить общую трудоемкость изготовления детали.

При объединении операций обычно существенно усложняется конструкция оборудования, что и является основным недостатком комбинированных машин. Примером комбинированной машины, в которой объединены операции сборки, формообразования и сварки, является машина для изготовления тормозных колодок автомобиля (рис. 4.8). Изделие (рис. 4.8, *а*) состоит из обода *1* и ребра *2* из низкоуглеродистой стали 08 кп. Рельефы различной формы могут выдавливаться на ребре (рис. 148, *б)* или ободе вдоль (рис. 4.8, *в)* или поперек (рис. 4.8, *г*).

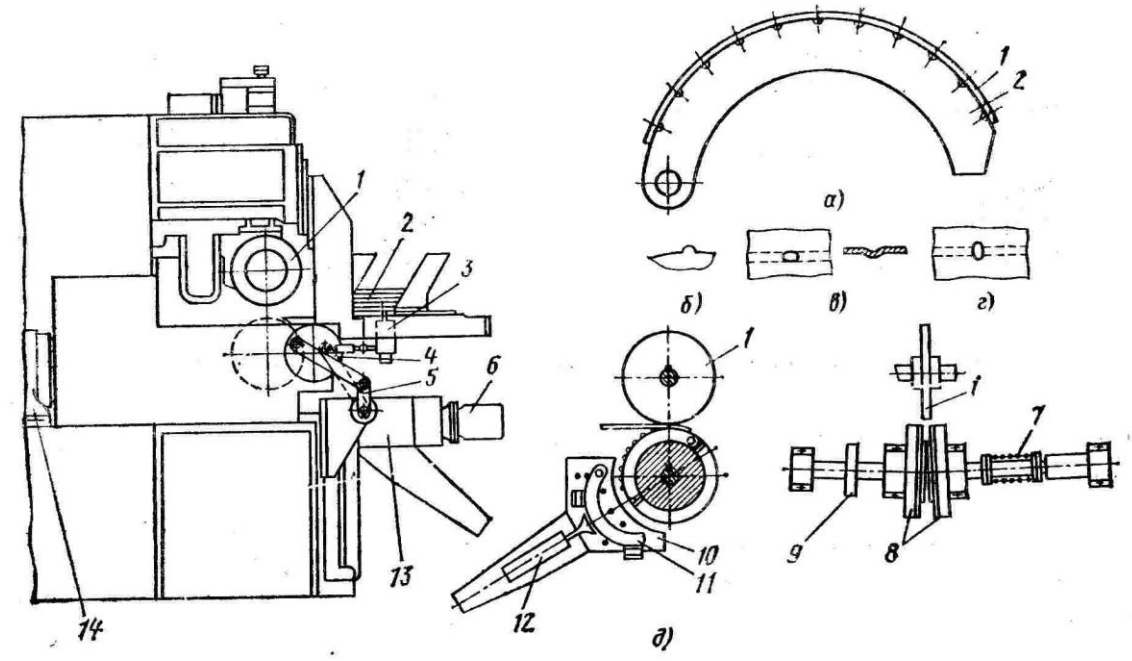


Рис. 4.8. Комбинированная машина дли рельефной сварки тормозных колодок автомобиля

На сварку обод поступает плоским и в машине одновременно со сваркой проводится его гибка по контуру ребра. Свариваемые детали предварительно закладывают в магазины-питатели *2*. Плоский обод из магазина *2* (рис. 4.8, *д)* подается толкателем *3* под ролики машины *1*, *8* механизмом подачи, состоящим из кривошипного механизма *5* с эксцентриком и системой тяг *4*. Привод механизма подачи ребра *13* работает от электродвигателя *6*. Ребра *11* подаются автоматически из магазина *10* механизмом *12*. Подача ребра и обода под ролики машины производится одновременно нижними роликами машины *8*, установленными под углом. Небольшой угол (1,5°) позволяет обеспечить хороший контакт близко к месту сварки под действием пружины 7. Привод машины – от электродвигателя *14* через редуктор и цилиндрическую шестерню *9*. Вся работа машины происходит при непрерывном вращении главного механизма. Цикл работы машины совершается за один оборот: при первом полуобороте происходит формовка и сварка, при втором – выгрузка готовой детали и закладка следующих заготовок. Такие машины работают с высокой производительностью (до 600 деталей/ч).

Многоэлектродные точечные и шовные машины – разновидность комбинированных сварочных машин. В них объединяют операции точечной, а иногда и рельефной сварки. Часто в этих машинах механизируют загрузочные операции, применяют сборочно-сварочные приспособления с элементами механизации. Функции зажимающих устройств выполняют сварочные пистолеты машины.

Примером многоэлектродной комбинированной машины является машина для сварки арматурных сеток (рис. 4.9). В машину подаются продольные и поперечные стержни, которые свариваются в местах пересечения рельефной сваркой. На сварной станине *1* машины установлено пять сварочных трансформаторов *8*, которые соединены с 16 электродными головками *6*, размещенными на горизонтальной балке станины. Поперечные стержни, предварительно уложенные в накопитель 7, автоматически подаются к месту сварки. Продольные стержни поступают через направляющие устройства *9*. Перемещение сетки с приваренными стержнями на шаг производится пневмоцилиндром *5*, который передвигает каретку *3* с помощью рычага *4*. Шаг передвижения

регулируется упорами *2*. На этой машине сваривают арматурные сетки шириной до 3000 мм с продольными стержнями диаметром до 32 мм и поперечным диаметром до 14 мм.

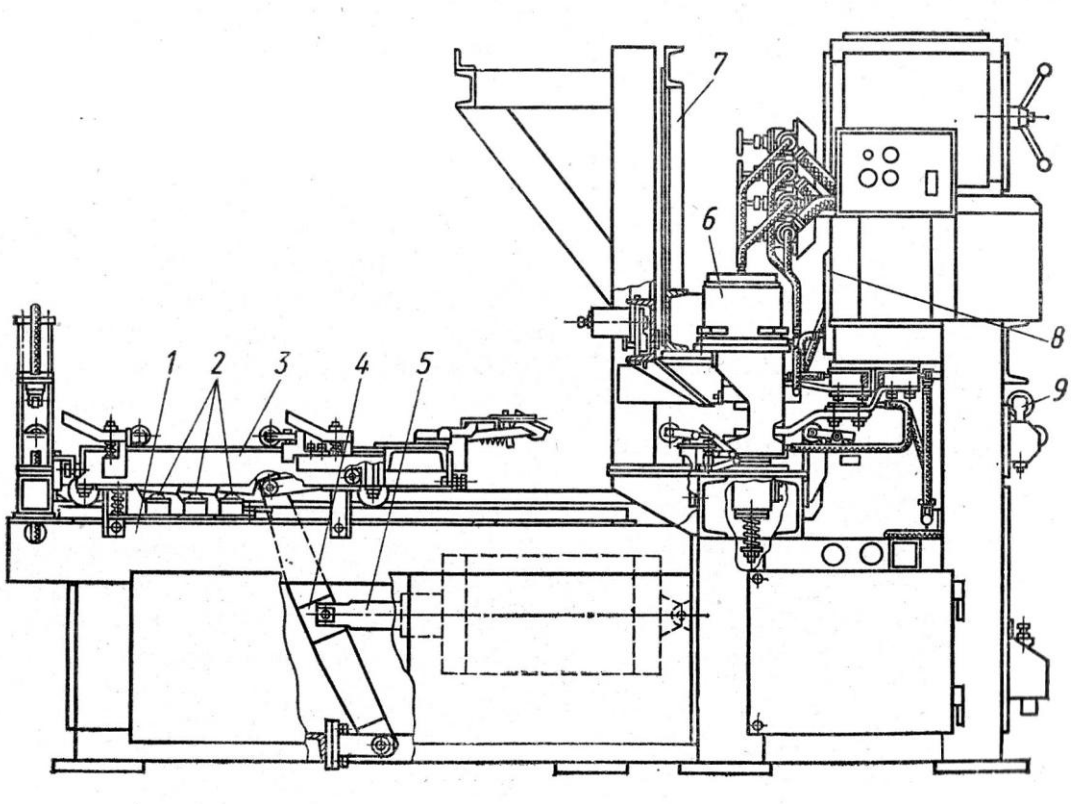


Рис. 4.9. Многоэлектродная машина для сварки арматурных сеток

На машинах аналогичной конструкции, предназначенных для сварки сеток со стержнями меньшего диаметра устанавливают устройства для правки продольных элементов. В этом случае их подают прямо из бухты. Сваренная сетка в таких машинах свертывается в рулон или разрезается на мерные заготовки в специальных устройствах, установленных на машине [6].

Многошовные машины используют при изготовлении изделий с параллельными швами, например теплообменников, топливных баков, плоскосворачиваемых труб, деталей подвижного состава железных дорог, корпусов холодильников и др.

Для изготовления деталей с двумя параллельными швами обычно используют спаренные шовные машины общего применения. Машины устанавливают на раму *4*, на которой имеются направляющие для регулирования расстояния между электродами (рис. 4.5). На направляющие детали загружают вручную.

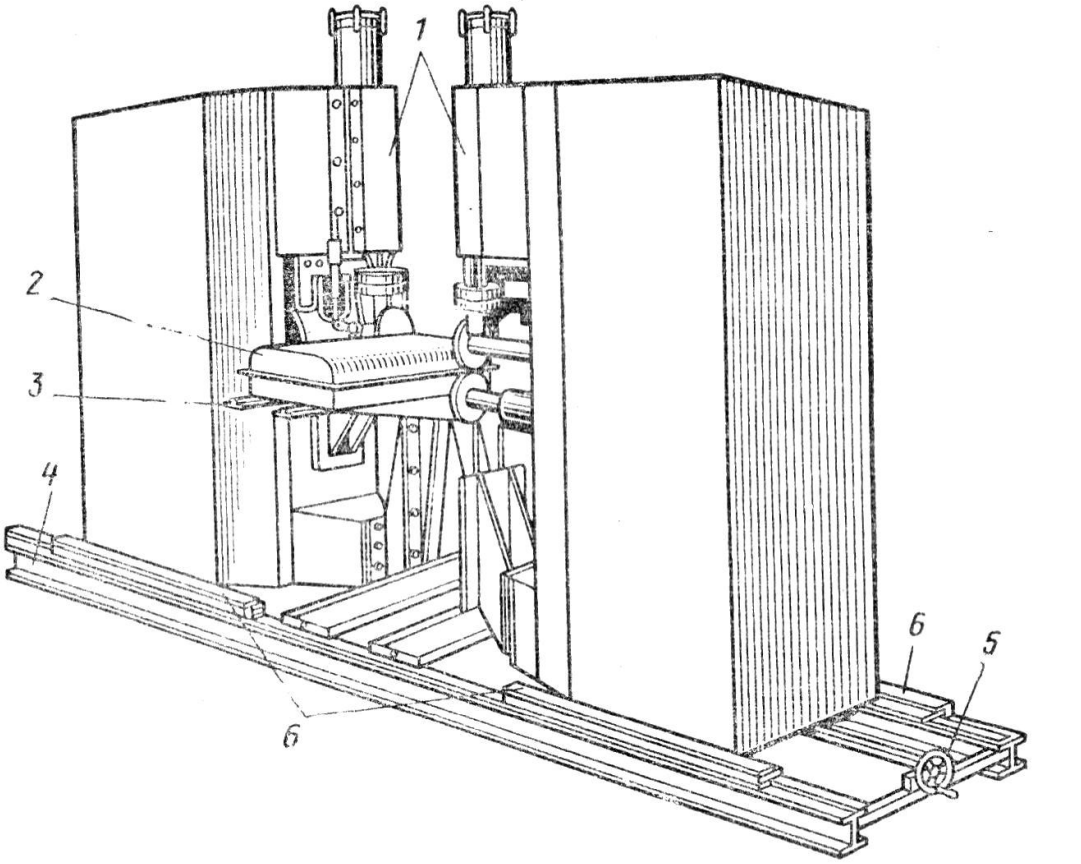


Рис. 4.5. Спаренные шовные машины для сварки топливных баков: *1* – шовные машины; *2* – топливный бак; *3* – направляющие для перемещения бака; *4* – рама для установки машин; 5 – ходовой винт для передвижения машин; *6* – направляющие для передвижения машин

4.5. Промышленные роботы

Роботы применяют для механизации процессов контактной, чаще точечной сварки, а также для механизации загрузочных, разгрузочных и транспортных операций.

Промышленный робот – это автоматическая машина, представляющая собой совокупность манипулятора и перепрограммируемого устройства управления, для выполнения в производственном процессе двигательных и управляющих функций, заменяющих аналогичные функции человека при перемещении предметов производства или технологической оснастки.

Современные промышленные роботы классифицируют по специализации, грузоподъемности, по числу степеней подвижно-

сти рабочего органа, по способу установки, по виду систем координат, виду привода и др.

При контактной сварке роботы используют для перемещения деталей относительно электродов машины и перемещения сварочных клещей относительно детали [6].

Преимущества механизации с помощью промышленных роботов: простота переналадки на другие программы, при изменении детали не требуются средства на проектирование и изготовление роботов, стоимость и сроки внедрения роботов меньше соответствующих сроков и стоимости автоматических линий.

В роботах для контактной сварки применяют три вида систем координат манипуляторов. В первой группе роботов рабочий орган перемещается в пространстве по координатам сферической системы (повороты в горизонтальной и вертикальной плоскостях). Во второй – перемещение производится в цилиндрической системе координат (поворот вокруг вертикальной оси, вертикальные и радиальные поступательные движения). В третьей системе перемещение производится в угловой системе координат (вращение вокруг вертикальной оси и угловое перемещение рабочего органа на двух качающихся рычагах.) Для контактной сварки рабочий орган должен иметь 3–6 степеней подвижности.

Силовой привод манипулятора может быть пневматический, гидравлический, электромеханический или комбинированный. В последнее время в робототехнике развивается направление по созданию модульной конструкции робота. Упрощение конструкции всего устройства для более простых случаев достигается уменьшением количества координат, по которым перемещается рабочий орган робота.

На рис. 4.6, *а* приведена кинематическая схема движений силового манипулятора с гидравлическим приводом, работающего в сферической системе координат. Все движения осуществляются гидравлическими цилиндрами. Гидроцилиндр *ГЦ1* перемещает поступатёльно клещи *К* для точечной сварки, *ГЦ2* поднимает или опускает ее; Под действием гидроцилиндров *ГЦ3* и *ГЦ4* через зубчатую рейку *Р* и зубчатое колесо *ЗК* поворачивается колонка робота. Аналогичное устройство используется для поворота сварочных клещей робота и их наклона. Рабочая зона такого робота показана на рис. 4.6, *б* (заштрихованная область) [6].

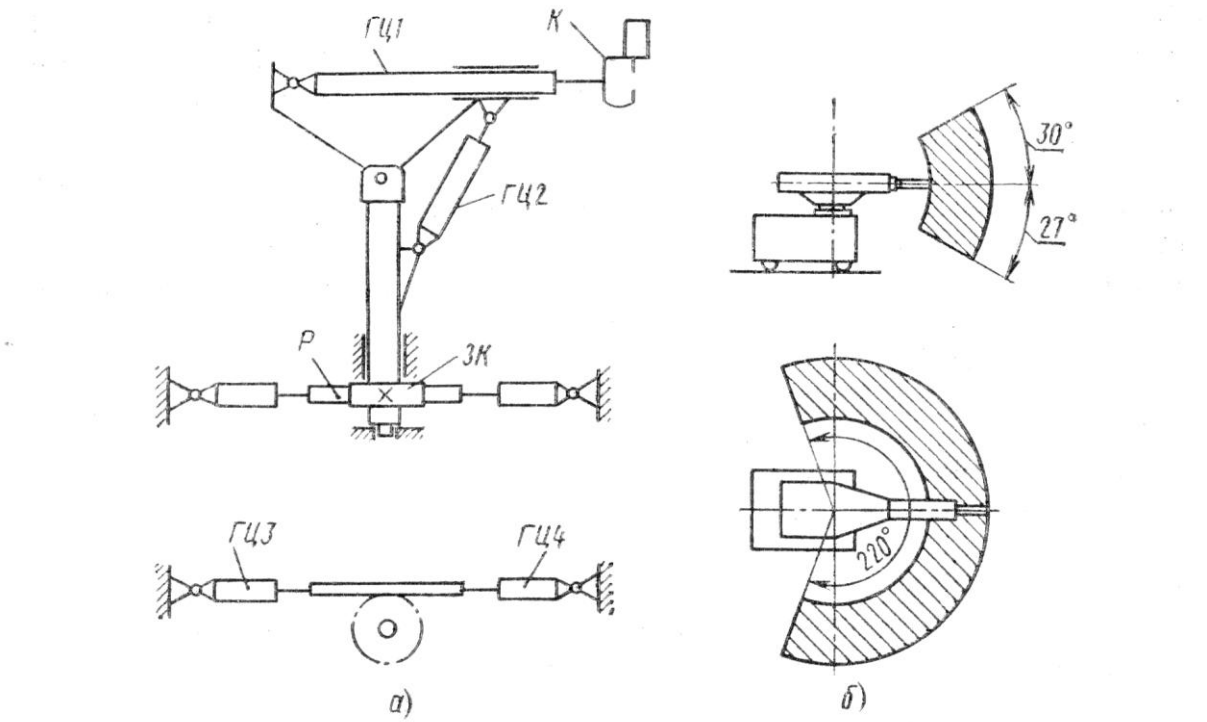


Рис. 4.6. Схема компоновки манипуляторов промышленных роботов (*а*) и рабочая зона робота *(б)*

Наиболее сложной частью промышленного робота является система его управления. Получили распространение роботы с жесткой программой управления. Они реализуют движения рабочего органа по установленной программе и не реагируют на изменившиеся внешние условия. В систему управления входят устройства, устанавливающие скорость и время передвижения рабочего органа по соответствующим координатам, устройство для записи и ввода команд и различная счетная, сравнивающая и кодирующая аппаратура.

Известны роботы, программа которых записывается на магнитном барабане.

Современный промышленный робот имеет систему обучения. Пользуясь выносным пультом управления, оператор выполняет заданный технологический цикл, нажимая соответствующую кнопку на пульте. При этом рабочий орган может перемещаться в замедленном темпе, что увеличивает точность позиционирования [6].

Точность перемещения рабочего органа робота зависит от многих условий и в первую очередь от грузоподъемности робота. Для точечной сварки используют роботы с массой клещей до 35

кг. Точность позиционирования рабочего органа в зависимости, от конструкции робота колеблется в пределах ± (0,2–1,2) мм.

В промышленных роботах для точечной сварки применяют подвесные точечные машины е отдельно расположенным сварочным трансформатором или клещи со встроенным сварочным трансформатором. Иногда сварочный трансформатор размещают на подвижной части робота. В этом случае трансформатор с клещами связывают жестким токоподводом со скользящими контактами.

Наиболее часто промышленные роботы при контактной сварке используют для загрузки и съема деталей и передвижения их под электродами машины. Мелкие детали зажимаются захватным устройством робота, подносятся к электродам машины и передвигаются относительно них. Более крупные детали следует располагать на приспособлении и передвигать их относительно электродов вместе с приспособлением.

На рис. 4.7 показана схема робототехнического комплекса, состоящего из контактной машины 7, робота *4* и ориентирующих и подающих устройств.

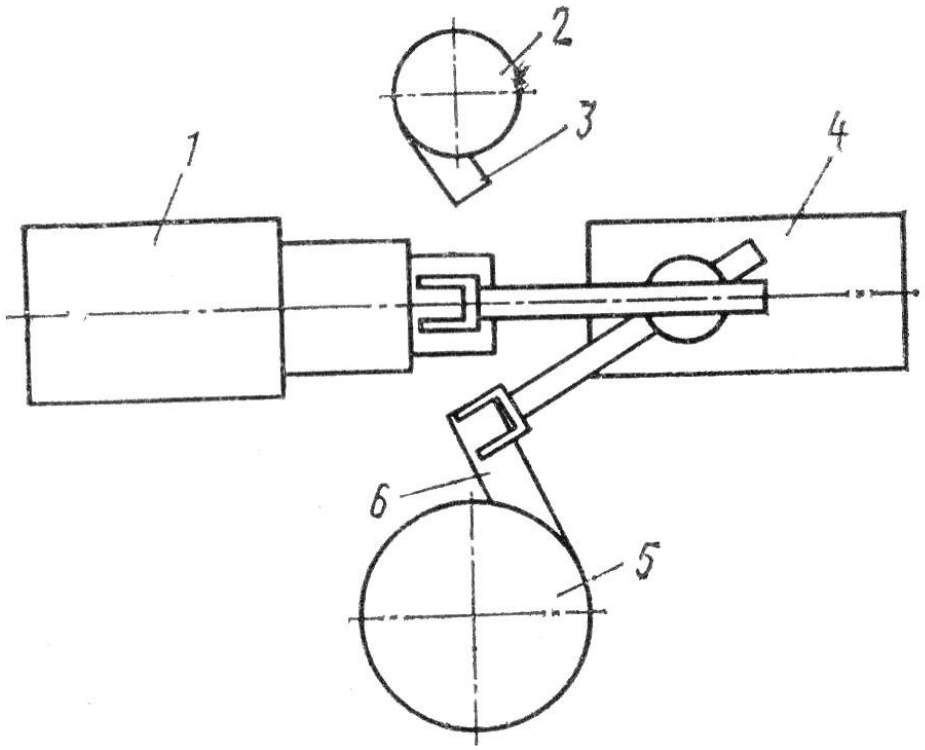


Рис. 4.7. Схема робототехнического комплекса для точечной или рельефной сварки мелких деталей

Свариваемые детали ориентируются в необходимое положение в устройствах *2* и *5*. Они представляют собой чаше всего вибробункер или магазин-накопитель. Детали из этих устройств по лоткам 3, *6* подаются в фиксатор, откуда их забирает захватное устройство робота. В таких комплексах используют роботы е одним или двумя рабочими органами, которые и подают детали на электроды машины в определенной последовательности. Последние имеют большую производительность.

На рис. 4.8 показана распространенная схема линии окончательной сварки крупногабаритных штампосварных деталей (кузовов, кабин автомобилей).

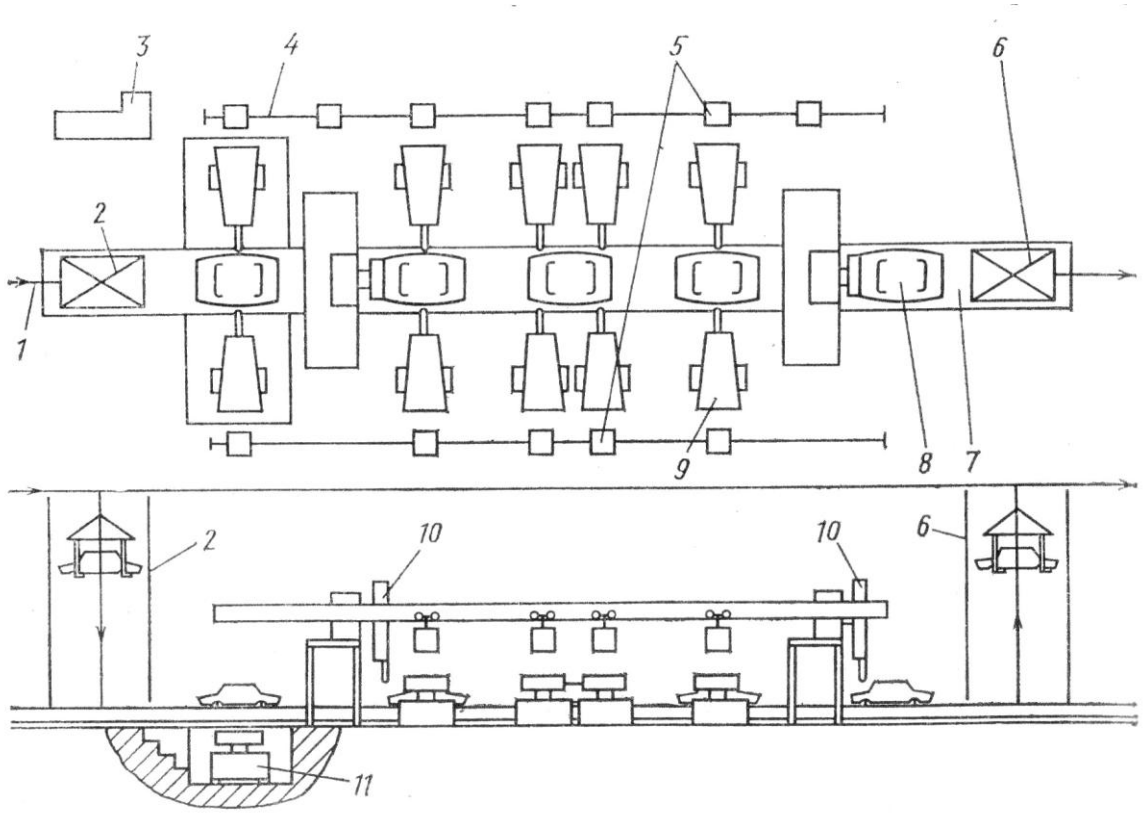


Рис. 4.8. Схема участка точечной сварки кузовов легковых автомобилей с применением роботов

Сборка и сварка подузлов, а также и изделия в целом обычно производятся на автоматических или механизированных линиях на установленных в них многоэлектродных машинах. Собранное и предварительно сваренное изделие *8* толкающим конвейером *1* с помощью опускной секции *2* подается на пульсирующий напольный конвейер *7*, вдоль которого установлены промышлен-

ные роботы *9*. Их установка возможна по обеим сторонам конвейера, в специальных приямках *11* или на эстакадах *10* над конвейером. Их положение выбирают так, чтобы место сварки было в рабочей зоне промышленного робота. Сварочные трансформаторы *5* смонтированы на двух монорельсах *4* вдоль конвейера и связаны со сварочными клещами точечной машины гибкими кабелями вторичного контура. На одном конвейере можно изготовлять несколько типов кузовов. Линия управляется с общего пульта *3*. После окончания сварки спускная секция *6* снимает кузов с пульсирующего конвейера и передает на толкающий конвейер для транспортирования на отделочный участок [6].

На рис. 4.9 показана схема использования роботов, в которой применяется автоматическая гибкая транспортная система вместо конвейеров с жестким циклом работы.

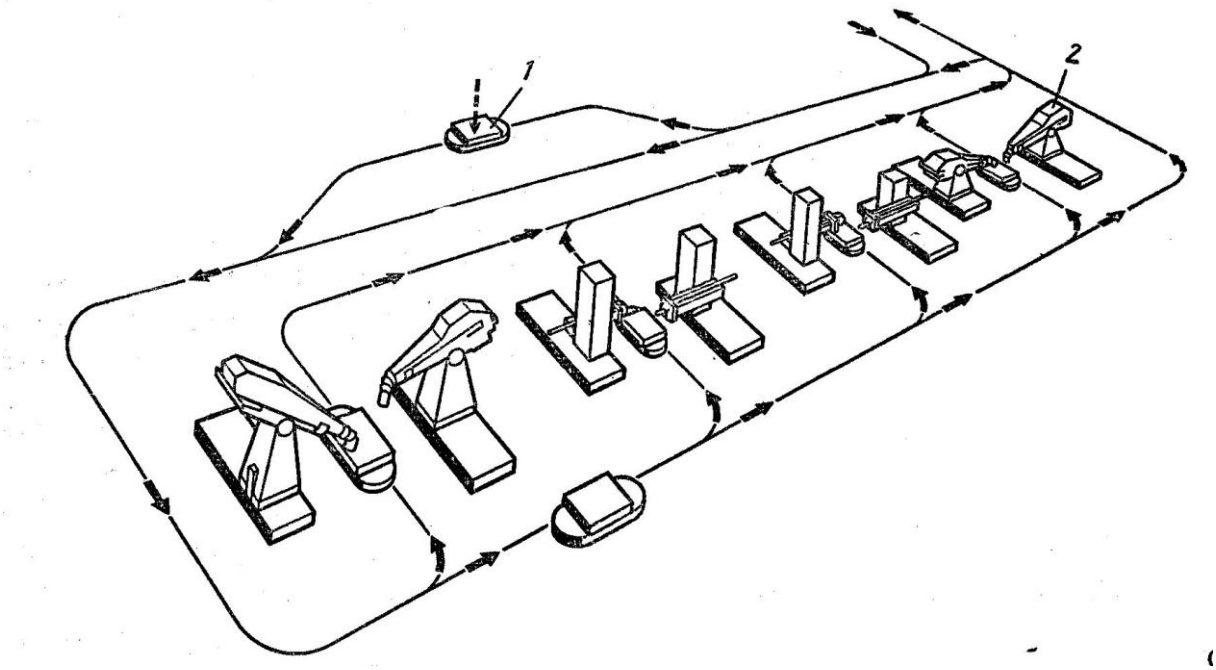


Рис. 4.9. Схема применения роботов для точечной сварки с гибкой транспортной системой вместо конвейеров с жестким циклом работы

Транспортный робот *1* этой системы имеет электропривод от аккумуляторных батарей и передвигается со скоростью до 60 м/мин. Направление его движения определяет магнитное поле высокочастотного кабеля, который заложен в полу цеха в направлениях необходимого движения роботов. На тележке транспортного робота смонтировано рабочее сборочно-сварочное при-

способление, которое вместе с собранными деталями устанавливается на складе-накопителе: Такой робот быстрее, чем обычный конвейер, доставляет детали к одной или нескольким системам сварочных роботов *2* для точечной сварки подвесными точечными машинами. Такая автоматизированная система имеет управление от ЭВМ. Основные ее преимущества – высокая производительность, возможность размещения производственного оборудования в сравнительно низких помещениях и быстрой автоматической перестройки на сборку и сварку различных конструкций. Производительность современных роботов достигает 60–80 точек/мин [6].

Применение промышленных роботов особенно перспективно в системах механизированных и автоматизированных линий.

4.6. Механизированные поточные и автоматические линии

Механизированные поточные линии широко применяют в серийном и массовом производствах. На этих линиях большая часть операций основного производственного процесса выполняется с помощью машин и механизмов. Механизируется также большинство вспомогательных операций.

Если на линии выполняются не только сварочные операции основного производственного процесса, то линию называют комплексной. Оборудование и рабочие места на линии расположены в порядке выполнения отдельных операций технологического процесса и их производительности взаимосвязаны. Загрузка и разгрузка машин деталями на таких линиях производится вручную или с применением несложных механизмов. Ниже рассмотрены некоторые характерные примеры механизированных линий, используемых в промышленности.

В автомобилестроении широко применяют поточные линии для сборки и сварки крупногабаритных штампосварных конструкций. Они эффективны при относительно небольших масштабах производства. На рис. 4.10 показана линия сборки и сварки боковин кузова автомобиля «Волга». Боковина – это объемная штампосварная конструкция из тонколистовой низкоуглеродистой стали, свариваемая в 700 точках. Для сборки и сварки боковин служит круговой напольный конвейер карусельного типа.

Диаметр рабочей площадки по оси приспособлений конвейера 10 м. На диске установлено шесть рабочих приспособлений *1*, по три для левой и правой симметричных боковин. По мере вращения конвейера происходят последовательная сборка и точечная сварка на подвесных машинах *2*. Окончательные сборочные и сварочные операции производятся на стационарном приспособлении *3* и отдельных рабочих местах *4*. После контроля на рабочем месте *5* деталь подвешивается на проходящий толкающий конвейер и подается на общую сборку кузова. При линейной скорости конвейера 4 м/мин собирают и сваривают 20 боковин в час.

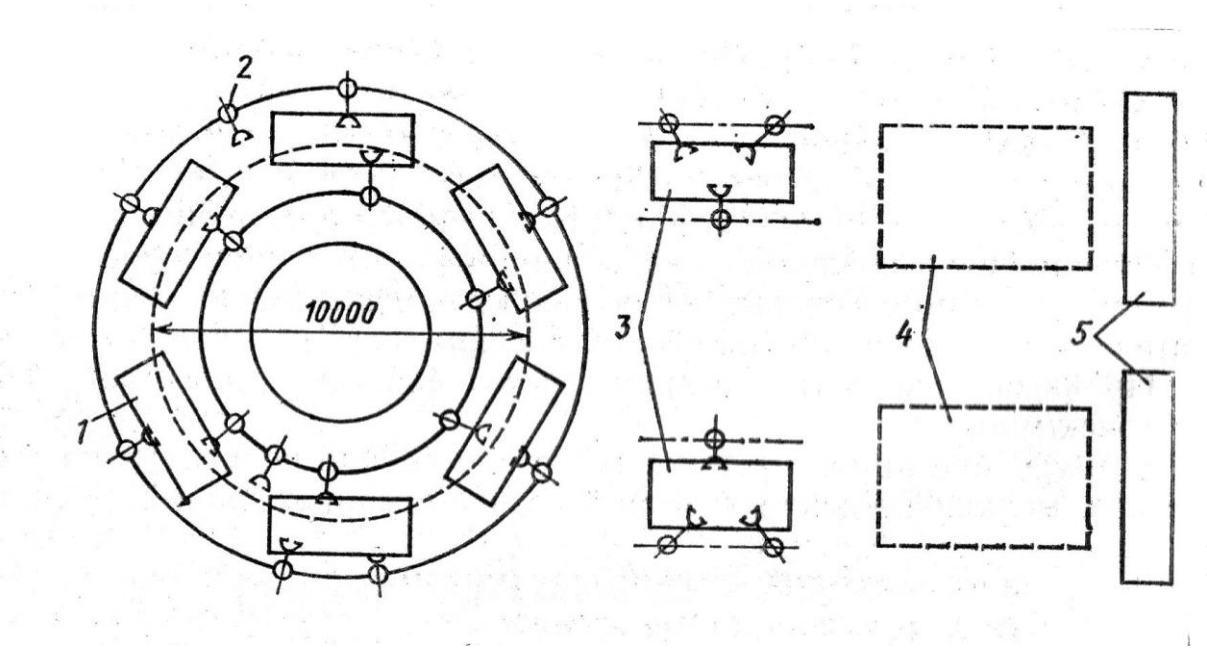


Рис. 4.10. Схема поточной линии сборки и сварки боковин кузова легкового автомобиля «Волга»

Автоматическая линия – это комплекс основного и вспомогательного, транспортного и другого необходимого оборудования, на котором без непосредственного участия человека выполняется определенная часть производственного процесса изготовления изделия. Линия имеет систему общего автоматического управления, обеспечивающего взаимодействие всех механизмов, устройств и аппаратуры, установленных на линии.

Функции обслуживающего персонала сводятся к наблюдению за работой линии и ее наладке. В отдельных случаях начальные загрузочные и конечные разгрузочные операции и некоторые

сборочные операции рабочий выполняет вручную или о помощью неавтоматических механизмов и устройств.

Ниже рассмотрены примеры автоматических линий, применяемых в промышленности.

Широко используются автоматические линии на основе многоэлектродных точечных машин. На рис. 4.11 показано основание кузова автомобиля «Волга». Это крупное изделие (масса 155 кг),изготовляемое из низкоуглеродистой тонколистовой стали толщиной 1–3 мм, состоит из 200 деталей. Изделие сваривают в основном точечной сваркой. Из общего объема сварки (1200 точек) 870 точек сваривают на автоматической линии (рис. 4.12). Линия состоит из семи многоэлектродных четырех колонных прессов, загрузочных и поворотных приспособлений, соединенных между собой транспортным конвейером для передачи изделия с одной позиции на другую сосредней скоростью 1,5 м/с. Всего линия включает 13 отдельных позиций. Операции закладки частично механизированы. Производительность линии до 40 изделий/ч.

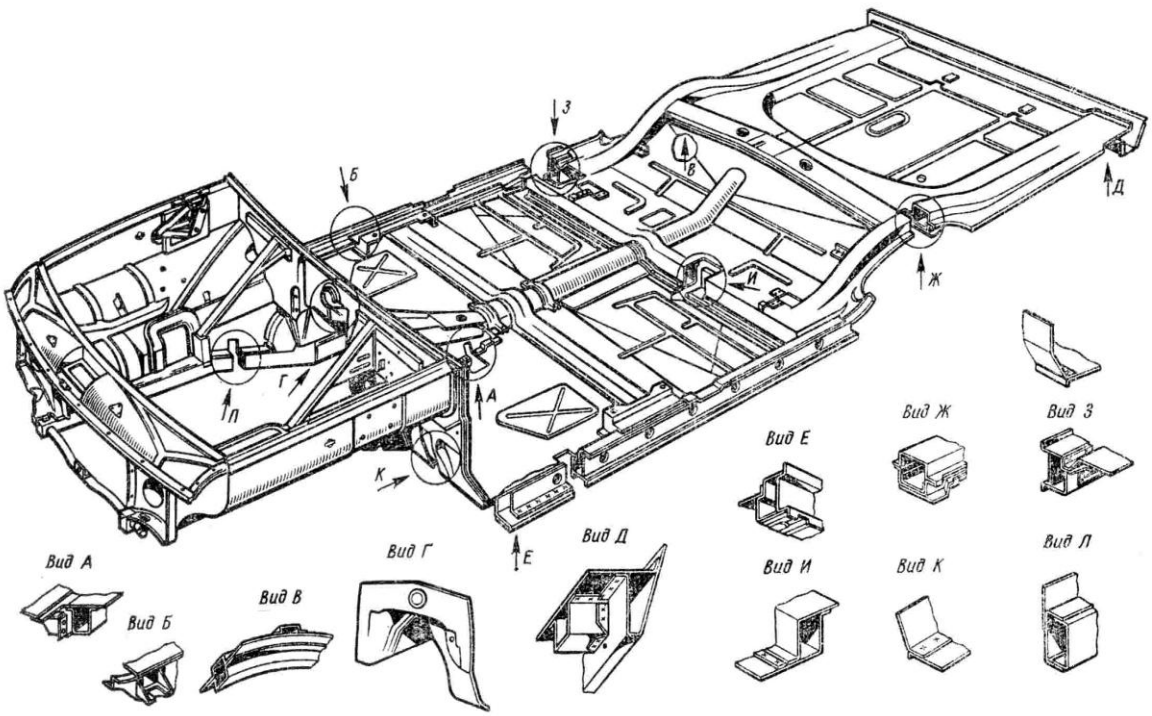


Рис. 4.11. Основание кузова (пол) легкового автомобиля ГАЗ-24 «Волга»

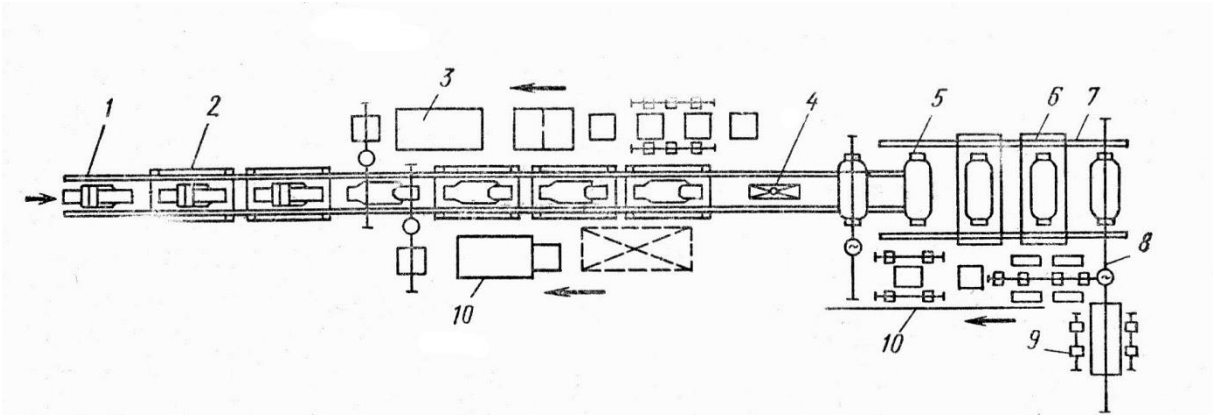


Рис. 4.12. Автоматическая линия сварки основания кузова автомобиля «Волга»:
1 – транспортное устройство линии для продольной и поперечной передачи основания кузова; *2, 6* – многоэлектродные машины; *3* – участок сборки и сварки заднего пола; *4* – позиция поворота кузова на 90°; 5 – позиция для точечной прихватки на подвесных машинах: *8* – монорельс электроталью для съема основания кузова; *9* – участок исправления дефектов; *10* – участки сборки и сварки узлов передней части основания

Кабина грузовых автомобилей – крупный объемный штампосварной узел, и автоматизация процесса его сборки и сварки сложная задача. На рис. 4.13 приведена узловая схема кабины грузового автомобиля ЗИЛ-130, а на рис. 4.14 автоматическая линия для ее сборки и сварки. Кабину изготовляют из тонколистовой низкоуглеродистой стали. Линия выполнена на многоэлектродных точечных машинах. Кабину последовательно собирают на двух параллельных механизированных линиях. Для прихватки применяют подвесные точечные машины. Окончательная сварка кабины 2 в 377 точках производится на четырех многоэлектродных машинах *1, 3, 4, 5*. Кабины транспортируются по линии системой тележечно-шаговых конвейеров. Каждое рабочее место оснащено подъемным столом, который снимает поступающую кабину с конвейера. После окончания операции все столы опускаются и кабина попадает на шаговый транспортный конвейер для перемещения на следующую операцию сварки. Производительность линии 110 кабин в смену [6].

На рис. 4.15 приведена схема автоматической линии изготовления колес легковых автомобилей. Колесо автомобиля состоит из диска и обода. Обод собирается и сваривается с диском в восьми точках. На этой линии кроме сварочных операций выпол-

няются операции правки полосы, закатки – обода, обрезки грата, профилирования обода и др. Линия состоит из пяти участков, связанных между собой транспортными устройствами

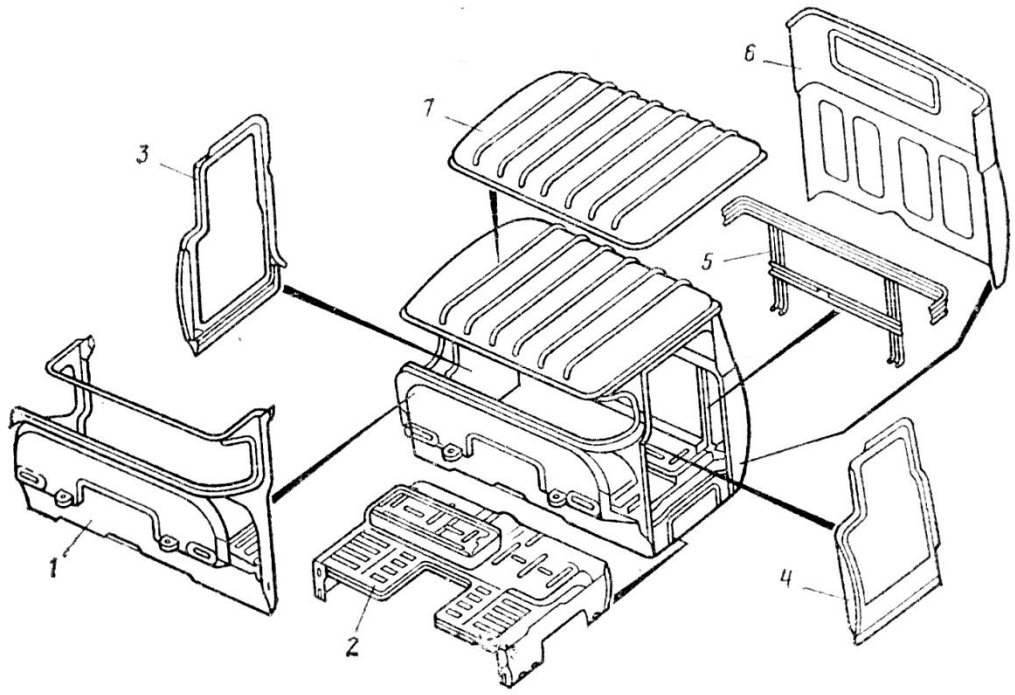


Рис. 4.13. Узловая схема кабины грузового автомобиля ЗИЛ-130:
1 – передок; *2* – основание кабины; *3, 4* – боковины; *5* – каркас задка; *6* – задка; *7* – панель крыши

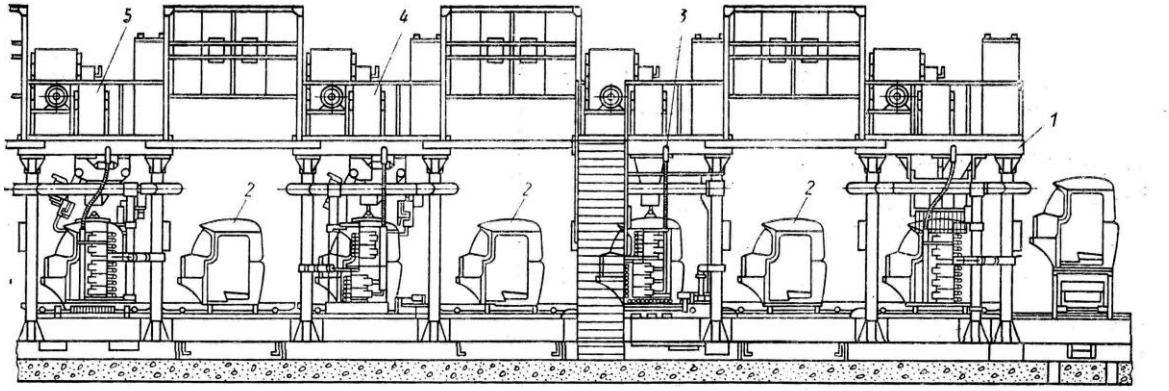


Рис. 4.14. Автоматическая линия сборки и сварки кабин грузового автомобиля ЗИЛ-130

На участке *А* подготовки ленты все операции совершаются автоматически, кроме загрузки накопителя *1*, выполняемой вручную. Поступающие рулоны ленты *2* разматываются и правятся в машине 5, обрезаются на мерные полосы ножницами *4* и подают-

ся в очередной накопитель *5*. Из накопителя полоса поступает на участок *Б* заготовки и сварки. Первая машина *6* этой линии завивает обод, который подъемным устройством *7* подается к желобам *8*, направляющим ободья к стыковым машинам *9*. Механический оператор *11* этих машин принимает обод, ориентирует его относительно электродов, подает к зажимам сварочной машины и после сварки направляет в установку *10* для срезки грата. Затем обод по желобу *12* подается на участок *В* линии для профилирования обода в машинах *14, 16*.

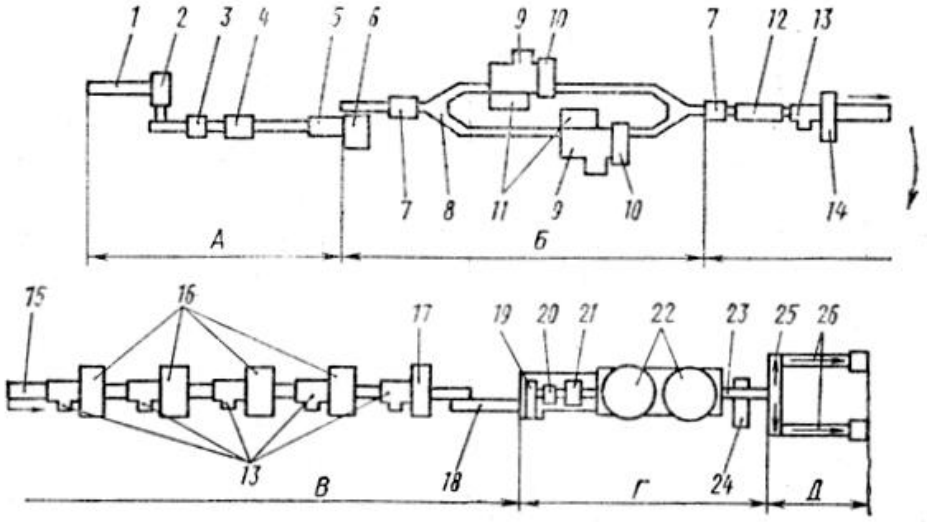


Рис. 4.15. Схема автоматической линии изготовления колес легковых автомобилей

На очередную машину обод передается по транспортному желобу *15*. Загрузку ободьев в машины для профилирования обеспечивает специальное загрузочное устройство *13*. В конце этого участка обод окончательно калибруется на установке *17*. После калибрования обод кантуется и по наклонным ленточным конвейерам *18* направляется на участок *Г* сборки и сварки колес. На рабочем месте *20* диски с ободом собирают вручную. Обод подается устройством *19*, а диск транспортируется с другого участка автопогрузчиком [6].

После сборки на прессе *21* пробивается ниппельное отверстие, диск окончательно запрессовывается в обод и колесо сваривается на двух четырех электродных машинах *22*. После сварки колесо конвейером *23* передается на конечный участок линии *Д*,

где окончательно контролируется на установке *24*. Годные колеса по конвейеру *25* направляются на окраску, а колеса, имеющие дефекты, по конвейеру *26* направляются на участок исправления брака. Производительность линии 720 колес/ч. Линии изготовлены фирмой Kieserling (Германия) и эксплуатируется на ВАЗе.

На рис. 4.16 показана схема автоматической линии изготовления радиаторов отопления. Панель этого радидтора представляет собой плоскую деталь, состоящую из двух половинок со штампованными каналами для циркуляции воды. Детали изготовляют из низкоуглеродистой тонколистовой рулонной стали толщиной 1,5 мм. По периметру деталь сваривается шовной сваркой, а между каналами – точечной. Два патрубка к каждому радиатору приваривают стыковой сваркой оплавлением.

Лента разматывается из двух рулонов *1* и подается с большой скоростью (до 20 м/мин) в формовочную клеть *2*. Каналы в полосе формируются валками, один из которых служит пуансоном, другой – матрицей. На следующей позиции *3* установлена подвижная стыковая машина для приварки двух патрубков к верхней панели. После сварки специальный пуансон прошивает отверстие и срезает грат. На позиции *4* происходит точечная сварка на многоэлектродной машине. Продольные швы сваривают на двух сварочных машинах *5*, установленных одна против другой. На следующей позиции *6* две шовные машины с подвижными каретками сваривают поперечные швы. Затем радиаторы отделяются от полосы летучими ножницами *7*, конвейером подаются на гидропресс для испытания и поступают в отделение окраски.

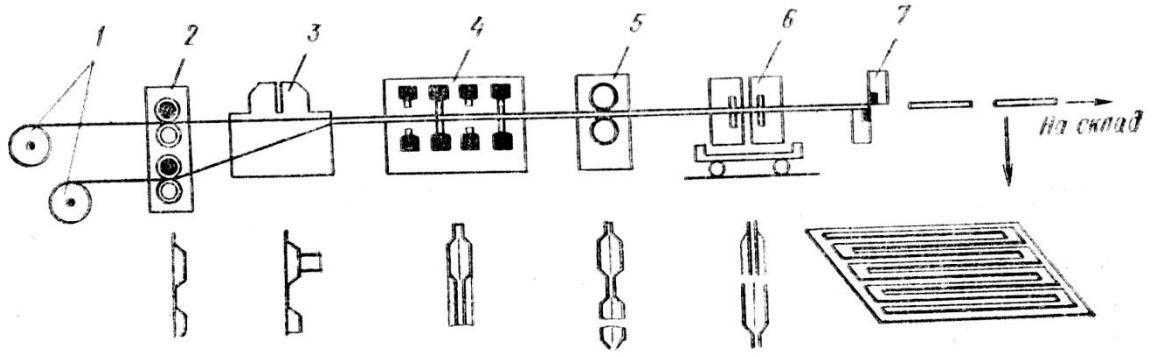


Рис. 4.16. Схема автоматической линии производства радиаторов отопления

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чуларис, А. А. Расчет и проектирование оборудования для контактной сварки: Учеб. пос. / А. А. Чуларис, А. И. Попов, Н. Г. Чередниченко, Д. В. Рогозин – Ростов н/Д: Изд. центр ДГТУ, 2003. – 162 с.
2. Технология и оборудование контактной сварки / Под ред. Б.Д. Орлова. – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с.
3. Оборудование для контактной сварки: Справ. пос. / Под ред. В. В. Смирнова. – СПб.: Энергоавтоиздат, 2000. – 848 с.
4. ГОСТ 15878-79 «Контактная сварка. Соединения сварные. Конструктивные элементы и размеры».
5. ГОСТ 297-80 «Машины контактные. Общие технические условия».
6. Гуляев, А. И. Технология и оборудование контактной сварки. – М.: Машиностроение, 1985. – 256 с.
7. Кочергин, К. А. Контактная сварка. – Л.: Машиностроение, 1987. – 240 с.
8. Липа, М. Контактная рельефная сварка. – Киев: Техніка, 1970. – 324 с.
9. Сварка в машиностроении: справочник. В 4-х т.: том 2 / под ред. Акулова. – М.: Машиностроение, 1978. – 462 с.
10. Сварка в машиностроении: справочник. В 4-х т.: том 3 / под ред. Винокурова. – М.: Машиностроение, 1978. – 567 с.
11. Сварка и свариваемые материалы: справочник. В 3-х т.: том 1 Свариваемость материалов / под ред. Макарова. – М.: Металлургия, 1991. – 528 с.
12. Чулошников, П.Л. Контактная сварка. В помощь рабочему-сварщику. – М.: Машиностроение, 1977. – 144 с.
13. Кабанов, Н.С. Сварка на контактных машинах. – М. Высш. школа, 1979. – 215 с.
14. Кабанов, Н.С. Технология контактной стыковой сварки. – М. Машиностроение, 1970. – 264 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ…….. 3
1. ОБРАЗОВАНИЕ СОЕДИНЕНИЙ КОНТАКТНОЙ СВАРКОЙ.....……. 6
1.1 Общие сведения……..…….. 6
1.1.1. Сущность контактной сварки……... 6
1.1.2. Способы контактной сварки…… 6
1.1.3. Общая схема формирования соединений при контактной сварке……... 10
1.1.4. Процессы, протекающие при контактной сварке…….. 14
1.1.5. Преимущества и область применения контактной сварки……. 15
1.1.6. Технико-экономические показатели…… 16
1.2 Источники тепла при контактной сварке……. 19
1.2.1. Сопротивление контактов твердых деталей.. 20
1.2.2. Сопротивление жидкого контакта…….. 24
1.2.3. Собственное сопротивление деталей……. 25
1.2.4. Общее сопротивление зоны сварки…… 28
1.3 Нагрев деталей при контактной сварке……..... 29
1.3.1.Нагрев деталей при точечной, рельефной и шовной сварке…..…….. 29
1.3.2.Нагрев деталей стыковой сваркой сопротивлением……..…….. 35
1.3.3.Нагрев деталей стыковой сваркой оплавлением……. 38
1.4 Особенности поведения металла в контакте при сварке……..…..…..…. 40
1.4.1. Плавление и кристаллизация сварной точки. 40
1.4.2. Процессы рекристаллизации при стыковой сварке сопротивлением……...…. 41
1.4.3. Процесс оплавления……. 43
1.5 Процессы, протекающие в околошовной зоне…….... 47
1.6 Пластическая деформация при контактной сварке. 53
1.6.1. Роль пластической деформации……. 53
1.6.2. Пластическая деформация при точечной сварке……. 54

1.6.3. Особенности объемной пластической деформации при шовной и рельефной сварке.. 57
1.6.4. Пластическая деформация при стыковой сварке сопротивлением…… 59
1.6.5. Пластическая деформация при стыковой сварке оплавлением…….. 60
1.7 Удаление поверхностных пленок…….. 62
1.8 Дефекты сварных соединений и причины их возникновения……..... 68
2. ТЕХНОЛОГИЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ…….. 77
2.1. Технологический процесс изготовления сварных конструкций……..……..……... 77
2.1.1. Выбор способа сварки……... 77
2.1.2. Выбор рациональной конструкции деталей и элементов соединений……. 81
2.1.3. Выбор рациональной формы и размеров рабочей поверхности электродов и роликов 86
2.1.4. Изготовление деталей……. 88
2.1.5. Подготовка поверхности…… 88
2.1.6. Сборка…….. 91
2.1.7. Прихватка…… 92
2.2. Параметры режима контактной сварки..……. 93
2.2.1. Влияние свойств свариваемых металлов на выбор параметров режима контактной сварки……... 94
2.2.2. Режимы точечной, рельефной и шовной сварки. Влияние параметров режима сварки на прочность сварной точки……. 95
2.2.3. Режим стыковой сварки сопротивлением… 102
2.2.4. Режим стыковой сварки оплавлением…….. 105
2.2.5. Программирование режимов контактной сварки……... 112
2.3. Особенности контактной сварки различных сталей и сплавов……. 117
2.3.1. Низко и среднеуглеродистые, низколегированные стали…… 117
2.3.2. Легированные стали и титановые сплавы… 119
2.3.3. Алюминиевые сплавы…… 123

2.3.4. Магниевые и медные сплавы……. 126
2.3.5. Тугоплавкие стали…….. 128
2.4. Особенности точечной сварки различных соединений……..……. 130
2.4.1. Сварка деталей малой толщины…… 130
2.4.2. Сварка деталей большой толщины……... 131
2.4.3. Сварка пакета из трех и более деталей……. 132
2.4.4. Сварка деталей неравной толщины……... 133
2.4.5. Сварка деталей из разноименных материалов……. 136
2.5. Особенности технологии стыковой сварки различных деталей……..……... 137
2.6. Сборочно-сварочные приспособления…… 140
2.7. Дополнительная обработка сварных узлов……. 146
2.8. Контроль при контактной сварке……. 149
2.8.1. Способы и организация контроля…..……. 149
2.8.2. Контроль сварных соединений..…… 154
2.8.3. Контроль процесса сварки…… 158
3. МАШИНЫ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ…..……. 159
3.1. Классификация и назначение машин…… 159
3.2. Основные характеристики контактных машин..….. 162
3.3. Общая характеристика контактных машин…….. 165
3.3.1. Машины точечной сварки…… 165
3.3.2. Машины рельефной сварки……. 167
3.3.3. Машины шовной сварки…….. 168
3.3.4. Машины стыковой сварки……... 170
3.4. Механическая часть контактных машин……. 176
3.4.1. Корпуса и станины……... 177
3.4.2. Сварочный контур…… 178
3.4.3. Электроды…….. 183
3.4.4. Механизмы контактных машин…….. 191
3.5. Электрическая часть контактных машин…….. 201
3.5.1. Назначение и основные электрические показатели……. 201
3.5.2. Нагрузочные и внешние характеристики машин……. 205
3.6. Электрические цепи основных типов контактных машин……... 208

3.6.1. Однофазные машины переменного тока…… 208
3.6.2. Трехфазные низкочастотные машины…….. 210
3.6.3. Трехфазные машины с выпрямлением тока во вторичном контуре машины постоянного тока…… 212
3.6.4. Машины с аккумулированием (накоплением) энергии…….. 214
3.7. Назначение и характеристика основных элементов электрической части машин и аппаратуры управления……. 218
3.7.1. Сварочные трансформаторы……... 218
3.7.2. Контакторы……... 220
3.7.3. Регуляторы цикла сварки……. 223
3.7.4. Регулирование сварочного тока…….. 223
3.8. Установка и наладка контактных машин…….. 227
4. МЕХАНИЗАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ……. 229
4.1. Общая характеристика средств механизации и автоматизации.…… 229
4.2. Основные средства механизации и автоматизации 230
4.3. Механизированные сборочно-сварочные приспособления……..……... 231
4.4. Комбинированные сварочные машины……... 238
4.5. Промышленные роботы…… 241
4.6. Механизированные поточные и автоматические линии……... 247
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ……..……... 254
ОГЛАВЛЕНИЕ…… 255