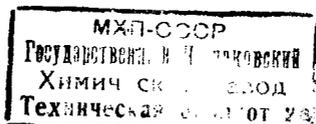


А. С. ГЕЛЬМАН
д-р техн. наук проф.

ТЕХНОЛОГИЯ КОНТАКТНОЙ ЭЛЕКТРОСВАРКИ

*Рекомендовано Отделом учебных заведений
Министерства тяжелого машиностроения СССР
в качестве учебного пособия для техникумов*



ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
Москва 1952

Книга является учебным пособием по курсу „Технология контактной электросварки“ для техникумов сварочной специальности. В ней рассмотрены основные технологические процессы контактной сварки и приведены наиболее существенные данные по схемам и конструкции типовых машин для ее выполнения.

Рецензент инж. **Н. П. Сергеев**

*Редактор канд. техн. наук **Н. С. Кабанов***

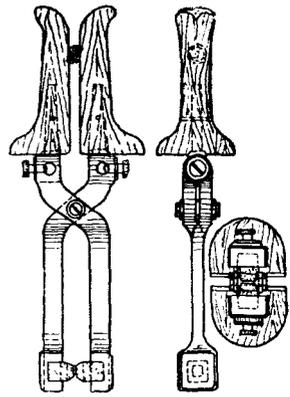
*Редакция литературы по тяжелому машиностроению
Зав. редакцией инж. **С. Я. ГОЛОВИН***

ВВЕДЕНИЕ

Контактная сварка — электромеханический процесс образования неразъемного соединения, при котором местный нагрев свариваемых деталей протекающим в них электрическим током сопровождается приложением давления, сжимающего нагретые детали в месте их соединения. Контактная сварка может осуществляться при нагреве металла ниже температуры плавления (сварка в пластическом состоянии) или после местного его расплавления в зоне образуемого соединения.

Начало применения контактной сварки относится к 70-м годам прошлого столетия, когда была предложена стыковая сварка сопротивлением. В 1887 г. Николай Николаевич Бенардос, талантливый русский изобретатель электродуговой сварки угольным электродом, запатентовал способ точечной сварки между угольными электродами. Он предложил конструкцию простейших клещей (фиг. 1), являющихся прообразом современных переносных точечных машин, широко применяемых в автомобильной промышленности и самолетостроении. Им же была изобретена и роликовая контактная сварка. Несколько позднее был разработан метод точечной сварки медными электродами, применяемый в настоящее время. Стыковая сварка получила особенно широкое развитие после изобретения в 1903 г. сварки оплавлением.

Особенностью контактной сварки является значительная скорость нагрева мест соединения, мало зависящая от относительно медленных процессов теплопередачи. Для быстрого нагрева требуются специальные сварочные машины большой электрической мощности (в отдельных случаях 1000 *кв*а и выше). Некоторые современные машины для контактной сварки обладают также значительной механической мощностью. Так, например, машины для стыковой сварки листов из нержавеющей стали шириной до 150 *мм* и толщиной до 4 *мм* развивают при закреплении деталей усилие свыше 500 *т* и сжимают нагретые листы к концу сварки силой до 150 *т*. Вес такой машины достигает 50 *т*. Естественно, что создание такого рода сварочных машин и широкое применение контактной сварки в СССР стало возможным только после коренной реконструкции энергетического хозяйства и создания достаточно мощной базы отечественного электромашиностроения на основе успешной реализации сталинских пятилеток.



Фиг. 1. Клещи Н. Н. Бенардоса для точечной сварки.

Развитие контактной сварки неразрывно связано с развертыванием производства машин для ее осуществления. Эти машины, как правило, состоят из трех основных элементов: сварочного трансформатора, понижающего напряжение сети (127—500 в) до нескольких вольт, достаточных для создания в сварочной цепи машины значительного тока, достигающего иногда 100 000 а; механической части, представляющей собой более или менее сложный станок для закрепления, сжатия и перемещения свариваемых заготовок (например, в роликовых машинах), и из аппаратуры управления, отличающейся в современных машинах автоматического действия значительной сложностью.

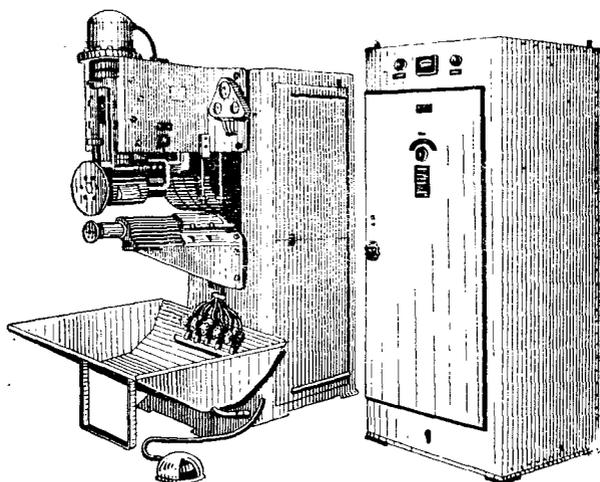
Первые машины для контактной сварки были выпущены в СССР в 1928 г. заводом „Электрик“. На протяжении двух первых пятилеток средняя мощность выпускаемых машин увеличилась почти в 5 раз при более чем 20-кратном росте их производства. В 30-х годах на заводах („Электрик“, „Светлана“) и в научно-исследовательских институтах проводятся большие работы по созданию аппаратуры автоматического управления машинами для контактной сварки.

К началу Отечественной войны благодаря работам А. А. Алексеева, А. И. Ахуна, И. А. Филановича и ряда других советских конструкторов в СССР выпускались машины всех основных типов мощностью до 600 ква с электрическим, пневматическим и гидравлическим приводом, в том числе стационарные и подвесные автоматические точечные машины, точно-рельфные машины (сварочные прессы), универсальные роликовые машины мощностью до 175 ква, мощные стыковые машины с гидравлическим приводом, машины для сварки по методу А. М. Игнатьева и ряд специальных машин для сварки труб, ободов велосипедных колес и др.

Производство оборудования для контактной сварки непрерывно продолжалось в нашей стране и в годы войны. В частности, в этот период было организовано серийное производство автоматических стыковых машин для сварки железнодорожных рельсов. Работы по созданию новых, более совершенных типов машин для контактной сварки получили особое развитие в послевоенный восстановительный период. Заводами электропромышленности освоен серийный выпуск высокопроизводительных точечных машин с пневматическим приводом, серии сварочных прессов для рельефной сварки, автоматических стыковых машин с электрическим и гидравлическим приводом, роликовых машин с игнитронными прерывателями (фиг. 2). Автомобильные заводы (ЗИС и ГАЗ) организовали для собственных нужд производство сложных многоточечных машин (фиг. 3), подвесных точечных машин автоматического действия, специализированных роликовых и стыковых машин и другого оборудования для контактной сварки. Группе работников Московского автомобильного завода имени Сталина за работы в области нового сварочного оборудования присуждена Сталинская премия за 1949 г. Сталинской премии удостоена также работа по созданию рельсо-сварочных машин (фиг. 4).

Немалый вклад внесли советские инженеры и исследователи в создание высокопроизводительных технологических процессов контактной

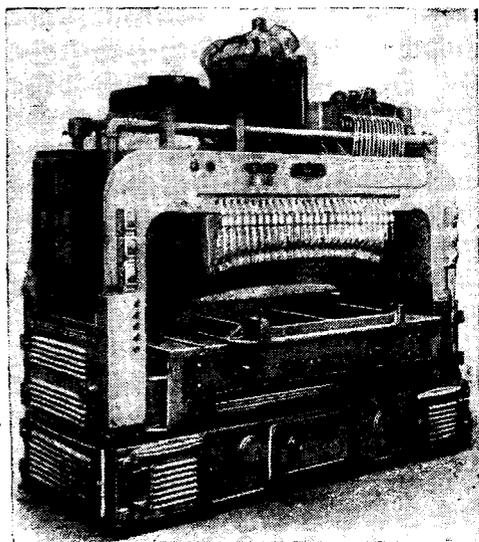
сварки. А. М. Игнатьев изобрел оригинальный метод сварки сопротивлением, получивший в дальнейшем практическое применение в индустрии.



Фиг. 2. Современная машина для роликовой сварки типа МСП-100-1 с игнитронным прерывателем.

ментальном производстве. В области точечной сварки следует отметить применение термической обработки непосредственно между электродами точечной машины (предложение Н. В. Гевелинга, 1935 г.), высоковольтную конденсаторную сварку (Г. И. Бабат), дилатометрический контроль процесса точечной сварки (Д. С. Балковец) и др.

Наряду с совершенствованием оборудования для контактной сварки и разработкой новых технологических процессов в СССР проводятся систематические исследования, направленные к уточнению физической природы явлений, наблюдаемых при контактной сварке, и к установлению основных закономерностей, связывающих эти явления. Работы К. К. Хренова по общей теории контактной сварки, исследования А. А. Сидоренко, К. А. Кочергина и др. по теории сварочного контакта, работы Н. Я. Кочановского и К. П. Имшенника по теории сварки оплавлением

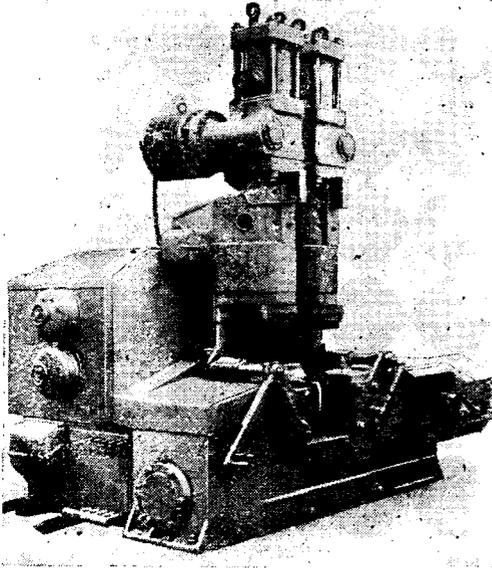


Фиг. 3. Многоточечная машина ЗИС.

и А. А. Алексеева по сварке сопротивлением, исследования Г. А. Николаева, Н. Н. Рыкалина, Г. П. Михайлова по прочности соединений, выполненных контактной сваркой, а также некоторые работы ЦНИИТМАШ по изучению точечной и стыковой сварки позволили установить истинную природу протекающих при контактной сварке процессов и наметить условия

и способы рационального применения этого метода сварки.

Народнохозяйственное значение контактной сварки очень велико. Оно определяется ее высокой производительностью, возможностью соединения деталей без применения присадочных материалов и флюсов, относительной легкостью механизации процесса, отсутствием выделения ядовитых газов и пыли, а также отсутствием вредных ультрафиолетовых лучей, что позволяет располагать машины для контактной сварки в любой точке производственного потока без специальных ограждений или сложных вентиляционных устройств, чередуют эти



Фиг. 4. Автоматическая стыковая рельсо-сварочная машина типа РСКМ-320У.

станками, прессами и другим промышленным оборудованием; применением при контактной сварке давления, часто дающего возможность собирать свариваемые детали непосредственно в сварочной машине (например, при стыковой сварке); возможностью успешной сварки деталей малой толщины с очень высокой производительностью и др.

Особенно широкое применение контактная сварка получила в массовом производстве и, в первую очередь, в автомобильной промышленности. Точечная сварка применяется здесь взамен клепки в узлах кузова, кабины, рамы и др. Растущее значение точечной сварки в советском автомобилестроении характеризуется следующими цифрами (округленно):

Тип автомобиля	Количество сварных точек на одну машину	Тип автомобиля	Количество сварных точек на одну машину
ЗИС-5	50	ГАЗ-2	1 500
ЗИС-101 с деревянным каркасом кузова	500	ГАЗ-51	2 800
ЗИС-150	2 000	М-1	3 200
ЗИС-110 с цельнометаллическим кузовом	7 000	„Победа“	6 500
		ЗИМ	10 000

Стыковая сварка используется для соединения отдельных штампованных заготовок кузова, для образования ободов колес, в узлах шасси и др.

Роликовая сварка применяется вместо пайки при изготовлении баков для горючего.

Одной из наиболее важных областей эффективного применения контактной сварки является производство сварного инструмента. Стыковая сварка рабочей части инструмента из быстрорежущей стали с хвостовиком из дешевой поделочной стали позволяет значительно сократить расход дорогостоящей высоколегированной стали.

Очень велик объем применения контактной сварки (точечной и роликовой) в современном самолетостроении (в самолетах некоторых типов число сварных точек достигает 250 000).

Контактная сварка успешно применяется в производстве тонкостенных стальных труб малого и большого диаметра. Высокая прочность получаемого продольного шва трубы и постоянство толщины ее стенки приводят к весьма эффективному использованию металла. В связи с этим электросварные трубы часто оказываются выгоднее цельнотянутых.

Большое народнохозяйственное значение имеют также сварка рельсовых стыков, стыковая сварка звеньев цепей, точечная сварка кузовов цельнометаллических вагонов, стыковая сварка всевозможных трубчатых элементов в паровых котлах, стыковая сварка листов и лент в прокатном производстве, обеспечивающая непрерывность действий и существенное повышение производительности основного и вспомогательного оборудования в цехах холодного проката на металлургических заводах. Очень большое значение приобретает контактная точечная и стыковая сварка в производстве арматурных сеток и каркасов для железобетона, в первую очередь, в связи с осуществлением великих гидротехнических строек коммунизма. Объем сварочных работ на этих строительствах характеризуется необходимостью сварки около 20 000 000 стыков.

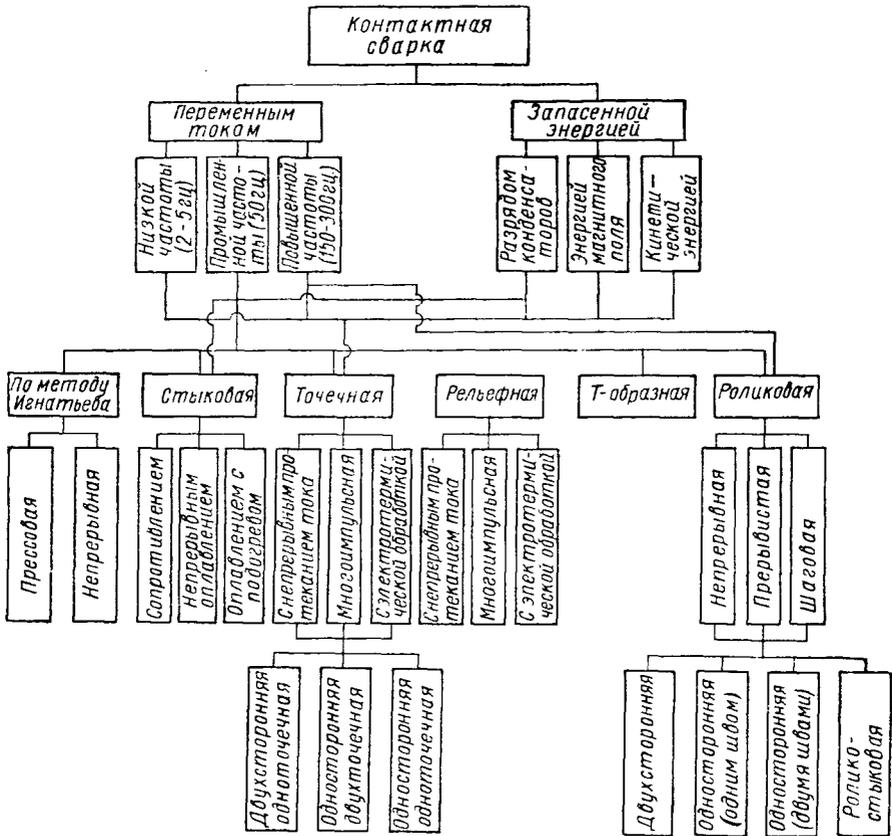
Невиданно быстрый рост промышленного производства в СССР и систематическое повышение его технического уровня открывают широкие перспективы развития контактной сварки. Это развитие должно идти, в первую очередь, в направлении дальнейшей механизации и автоматизации всех видов контактной сварки, создания сложных специализированных машин для автоматического выполнения комплекса сборочно-сварочных операций, улучшения энергетических характеристик оборудования (трехфазное питание, сварка запасенной энергией), расширения области эффективного применения контактной сварки (увеличение толщины деталей, свариваемых точками, и увеличение сечения заготовок, свариваемых встык).

ГЛАВА I

ОСНОВНЫЕ СПОСОБЫ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

§ 1. КЛАССИФИКАЦИЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

Современные методы контактной сварки могут быть классифицированы (фиг. 5): а) по способу питания сварочного transforma-



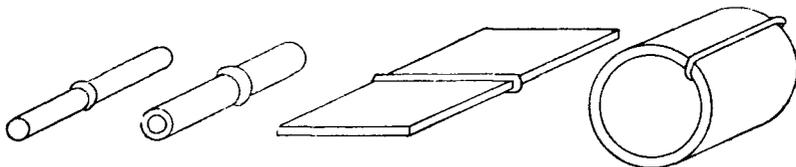
Фиг. 5. Классификационная схема контактной сварки.

тора — сварка переменным током (подавляющее большинство машин для контактной сварки питается однофазным переменным током

промышленной частоты 50 гц) или сварка запасенной энергией (необходимое для сварки одной точки или стыка количество энергии относительно медленно накапливается в конденсаторах, в электромагнитном поле специального трансформатора или во вращающемся маховике генератора и затем быстро используется в сварочной цепи машины в виде отдельного импульса большой мощности); б) по форме свариваемого соединения, определяющей тип сварочной машины, — стыковая сварка, сварка по способу Игнатъева, точечная, рельефная, Т-образная, роликовая и ролико-стыковая сварка; в) по технологическим признакам (например, стыковая сварка по методу сопротивления или по методу оплавления, непрерывная или прерывистая роликовая сварка); г) по способу подвода тока к свариваемым деталям (например, односторонняя и двухсторонняя точечная сварка).

§ 2. СТЫКОВАЯ СВАРКА И СВАРКА ПО МЕТОДУ ИГНАТЬЕВА

Стыковая сварка — вид контактной сварки, при котором соединяемые детали свариваются по всей плоскости их касания. Типовые примеры применения стыковой сварки показаны на фиг. 6. При стыковой сварке две детали А и Б (фиг. 7) одинакового или близкого по



Фиг. 6. Примеры применения стыковой сварки.

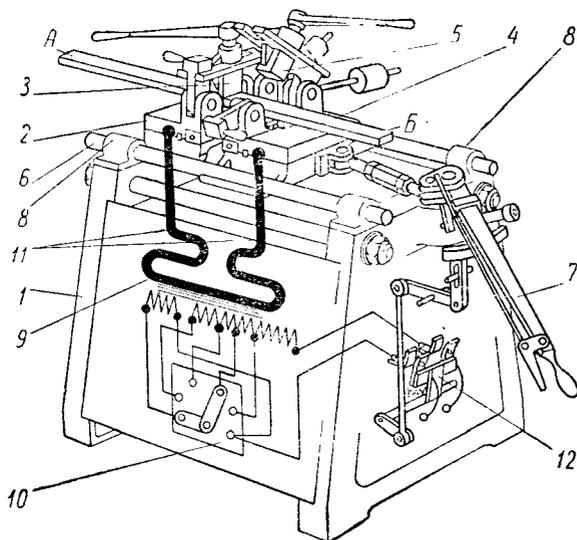
размерам сечения укрепляются в электродах (губках) стыковой машины. Простейшая неавтоматическая стыковая машина с рычажным приводом состоит из станины 1, на которой укреплена неподвижная плита 2 с левым зажимом 3. Подвижная плита (супорт) 4 с правым зажимом 5, показанным на схеме в раскрытом виде, жестко связана с двумя штангами 6, перемещающимися с помощью рычажной системы 7 в направляющих 8. Показанный схематически сварочный трансформатор 9 с секционным переключателем 10 монтируется в станине. Вторичный виток трансформатора соединяется с зажимными устройствами гибкими шинами 11. Включение тока осуществляется включателем 12, связанным с рычагом управления. Первичная обмотка трансформатора питается от сети переменного тока через секционный переключатель, изменяющий число включенных витков этой обмотки и, как следствие, напряжение и ток в сварочной цепи машины, т. е. мощность, развиваемую при сварке.

Существуют два основных способа стыковой сварки — *сопротивлением и оплавлением*. *Стыковая сварка сопротивлением — вид стыковой сварки, при котором концы плотно прижатых друг к другу*

деталей нагреваются протекающим в них электрическим током до температуры, лежащей ниже точки плавления, и при этом свариваются в пластическом состоянии. Таким образом, при сварке сопротивлением детали сжимаются и нагреваются непрерывно в течение всего процесса сварки.

Стыковая сварка оплавлением — вид стыковой сварки, при котором нагрев торцов свариваемых деталей до расплавления, осуществляемый при их сближении без приложения существенного усилия, сопровождается быстрым сжатием нагретых деталей (осадкой), ведущим к образованию сварного соединения.

При сварке оплавлением ток включается до приложения сжимающего усилия. Медленное перемещение подвижной плиты 4 стыковой машины (фиг. 7) сопровождается образованием электрического контакта в одной или нескольких точках на поверхности торцов свариваемых деталей. Вблизи этих контактов металл очень быстро (в течение тысячных долей



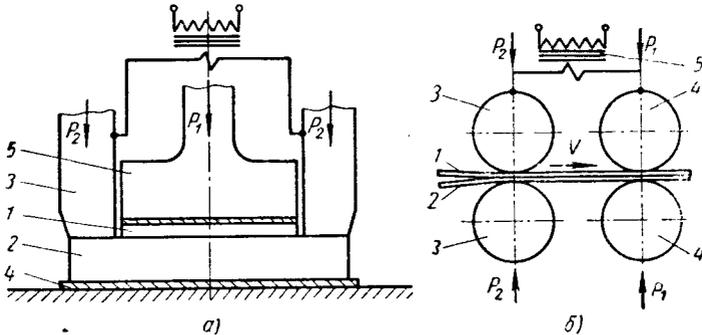
Фиг. 7. Схема стыковой машины с рычажным управлением. (А. И. Ахун.)

секунды) нагревается до расплавления, образуя между деталями одну или несколько перемычек жидкого металла, которые при дальнейшем нагреве разрушаются со взрывом. Разрушение перемычек сопровождается выбрасыванием из зазора между торцами расплавленных частиц металла в виде искр и некоторым укорочением деталей. При непрерывном сближении деталей образуются все новые и новые перемычки, интенсивно нагревающие торцы деталей. Взрывы перемычек, следующие друг за другом с очень малыми промежутками времени, создают впечатление непрерывного процесса искрообразования, характерного для сварки оплавлением. После прогрева деталей на достаточной длине от их торцов производится осадка с одновременным выключением тока.

Стадия непрерывного искрообразования при стыковой сварке называется *о п л а в л е н и е м*. Иногда процесс сварки оплавлением, состоящий в простейшем случае из собственно оплавления и осадки, усложняется введением предварительного подогрева, осуществляемого электрическим током непосредственно в стыковой машине. Площадь сечения стальных деталей, свариваемых оплавлением (с подогревом), достигает 25 000 мм².

Сварка по методу Игнатъева — вид контактной сварки, отличающийся от стыковой сварки сопротивлением тем, что электрический ток в свариваемых деталях протекает не перпендикулярно, а параллельно плоскости их соединения.

При прессовой сварке по методу Игнатъева (фиг. 8, а) пластинка 1 укладывается на пластинку 2, ток к которой подводится электродами 3. Для уменьшения потерь тепла применяются асбестовые прокладки 4. При медленном нагреве температура практически одинакова по всему

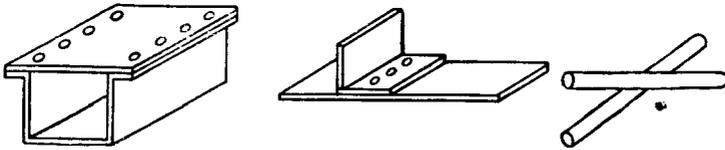


Фиг. 8. Принципиальные схемы прессовой (а) и непрерывной (б) сварки по способу Игнатъева.

сечению деталей. По достижении заданной температуры пластинки 1 и 2 обжимаются прессом 5, и происходит их сварка в пластическом состоянии. При непрерывной сварке по методу Игнатъева (фиг. 8, б) две полосовые заготовки 1 и 2 перемещаются со скоростью v между вращающимися роликами 3 и 4, соединенными со сварочным трансформатором 5. Полосы на участке между роликами нагреваются и под действием усилия P_1 свариваются. Сварка по методу Игнатъева находит применение в производстве инструмента.

§ 3. ТОЧЕЧНАЯ, РЕЛЬЕФНАЯ И Т-ОБРАЗНАЯ СВАРКА

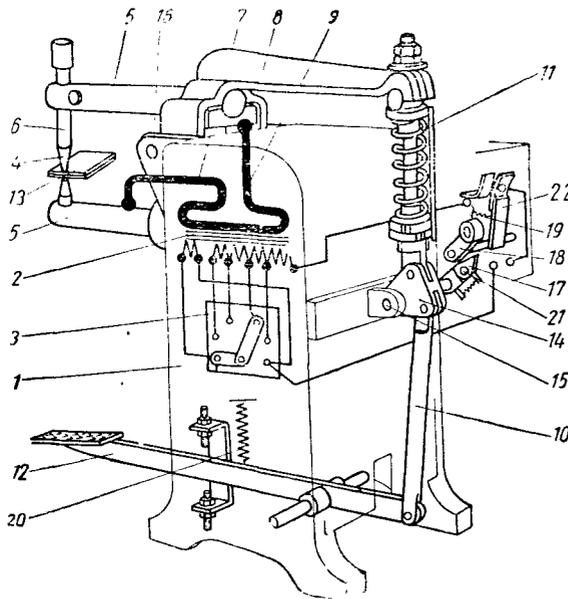
Точечная сварка — вид контактной сварки, при котором соединяемые детали свариваются не по всей поверхности их касания,



Фиг. 9. Простейшие примеры применения точечной сварки.

а в отдельных точках. Типовые примеры применения точечной сварки показаны на фиг. 9. Простейшая точечная машина неавтоматического действия с педальным приводом состоит из станины 1

(фиг. 10) с расположенным в ней сварочным трансформатором 2, который соединен с питающей машину электросетью через секционный переключатель 3. Электроды 4 укрепляются непосредственно в плече машины 5 или в специальном электрододержателе (свече) 6. Нижнее изолированное от станины плечо крепится к ней болтами и соединяется со вторичным витком трансформатора шиной 7. Верхнее плечо закрепленное в качающемся



Фиг. 10. Схема точечной машины с педальным приводом. (А. И. Ахун.)

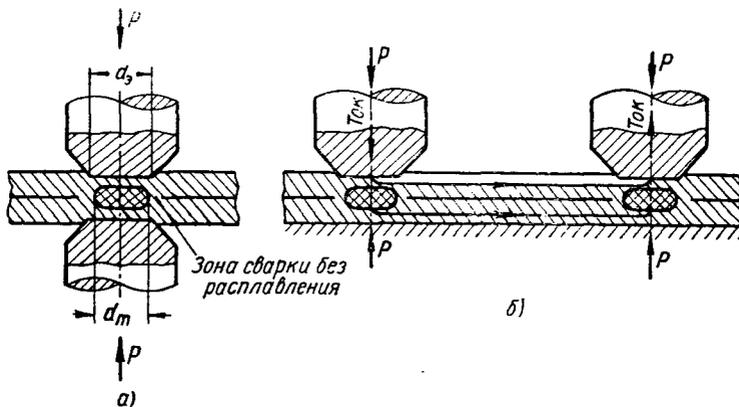
рычаге 8, соединено со вторичным витком трансформатора гибкой медной шиной 9. Качающийся рычаг 8 соединен рычажной системой 14 через пружину 11, регулирующую степень сжатия свариваемых деталей, с концом рычага педали 12. Детали 13 при нажатии на педаль сжимаются электродами, и одновременно включается механический выключатель 22 сварочный ток. По окончании сварки педаль отпускается, ток выключается и детали освобождаются.

Для изготовления электродов точечных машин применяются медь или специальные медные сплавы, обладающие высокой электро- и теплопроводностью. Вследствие этого нагрев поверхностей деталей, соприкасающихся с электродами, протекает медленнее нагрева внутренних слоев металла в зоне свариваемой точки. Процесс сварки обычно продолжается до тех пор, пока в центральной, наиболее нагретой зоне металл свариваемых деталей не начинает плавиться. Образовавшаяся в результате этого сварочная точка представляет собой чечевицеобразное ядро литого металла (фиг. 11, сечение ядра заштриховано), окруженное кольцом металла, в пределах которого сварка произошла в пластическом состоянии без расплавления. Это кольцо, сжатое при нагреве приложенным к электродам машины усилием, служит уплотнением, препятствующим вытеканию жидкого металла из ядра точки.

После сварки каждой точки сначала выключается ток, а затем снимается давление с электродов, и детали освобождаются из машины. Если изменить этот порядок и снять давление до выключения тока, то между электродами и деталями образуется плохой электрический контакт (как при стыковой сварке оплавлением), который, очень быстро

нагреваясь, обгорают. При этом повреждаются и свариваемые детали и электроды.

В зависимости от числа одновременно свариваемых точек различают одноточечную, двухточечную и многоточечную сварку. При подводе тока с двух сторон свариваемых деталей (фиг. 11, а) сварка называется двухсторонней; при одностороннем подводе тока (фиг. 11, б) — односторонней. При односторонней сварке ток, протекающий во вторичной цепи машины, распределяется между верхней и нижней деталями, как показано стрелками на фиг. 11, б. Сварочный нагрев в основном осуществляется частью тока, протекающей через нижнюю деталь и контакт между деталями.



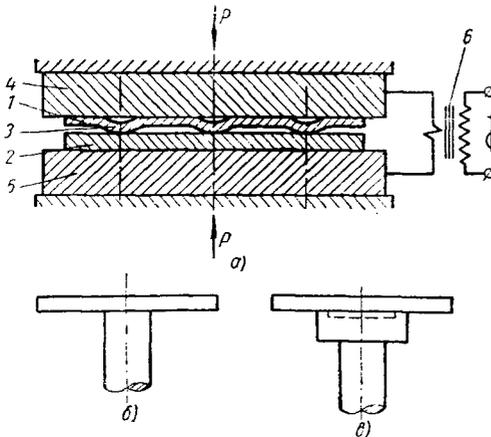
Фиг. 11. Расположение электродов при двухсторонней одноточечной (а) и односторонней двухточечной сварке (б).

При точечной сварке соединение между деталями осуществляется на сравнительно небольшой площадке — точке. Диаметр точки (d_m на фиг. 11, а) зависит от толщины свариваемых деталей и принятого технологического процесса. Обычно он близок к диаметру контактной поверхности электрода d_3 и лежит в пределах 3—25 мм.

Для соединения деталей обычно применяется несколько точек. В больших сварных узлах количество точек может достигать нескольких тысяч (например, в кузове автомобиля, в обшивке цельнометаллического вагона). Точечная сварка является наиболее распространенным видом контактной сварки. Она может осуществляться как переменным током промышленной и непромышленной частоты, так и запасенной энергией (см. фиг. 5).

Рельефная сварка — вид контактной сварки, аналогичной точечной, при котором соединение деталей осуществляется одновременно в нескольких точках, положение которых устанавливается выступами (рельефами), выштампованными на одной из деталей (фиг. 12, а). Свариваемые детали 1 и 2 (верхняя из них с выступами 3) сжимаются усилием P между нижней неподвижной и верхней перемещающейся контактными плитами 4 и 5. Под действием усилия P свариваемые детали плотно прилегают друг к другу в местах выступов. При включении

сварочного трансформатора δ , соединенного с контактными плитами, детали вблизи выступов интенсивно нагреваются. После достаточного нагрева и частичного расплавления выступов осуществляется сварка с одновременным расплющиванием выступов. Сваренные детали плотно прилегают друг к другу по всей поверхности. Рельефная сварка по своей сущности мало отличается от точечной. Для ее выполнения используются обычные точечные машины достаточной мощности, оснащенные электродами соответствующей формы, или специализированные сварочные прессы. Последние отличаются от точечных машин



Фиг. 12. Схема рельефной сварки (а) и вид Т-образного соединения при сварке по всей площади меньшей детали (б) и по круговому выступу (в).

(фиг. 12, б) или на отдельных участках, определяемых предварительной подготовкой свариваемой поверхности одной из деталей (фиг. 12, в). Т-образная сварка производится на точечных машинах или на сварочных прессах. Рельефная и Т-образная сварка применяются главным образом в массовом производстве, в частности, в автомобильной промышленности.

§ 4. РОЛИКОВАЯ И РОЛИКО-СТЫКОВАЯ СВАРКА

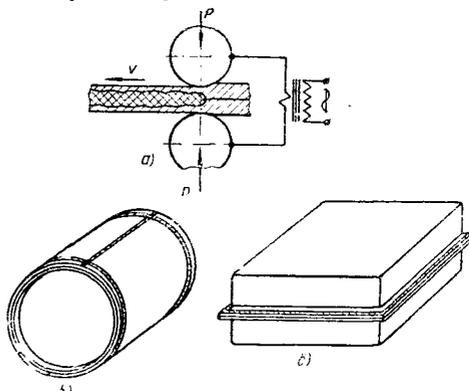
Роликовая (или шовная) сварка — вид контактной сварки, при котором между свариваемыми деталями образуется непрерывный шов путем постановки последовательного ряда частично перекрывающихся друг друга сварных точек (фиг. 13, а). При роликовой сварке обычно обеспечивается плотность шва, т. е. непроницаемость его для жидкостей и газов. Плотные швы необходимы в различных баках, сосудах и тому подобным изделиях, широко применяемых в автотракторной промышленности, самолетостроении и т. д. Типовые примеры применения роликовой сварки приведены на фиг. 13, б и в. Роликовая сварка осуществляется, как правило, на роликовых машинах, снабженных вращающимися дисковыми электродами. Электрокинемати-

большей жесткостью станины, увеличенным усилием, развиваемым механизмом сжатия, и относительно малым вылетом, т. е. расстоянием от оси электродов или контактных плит до корпуса машины. Вылет машины определяет предельный размер деталей, вводимых при сварке в контур машины.

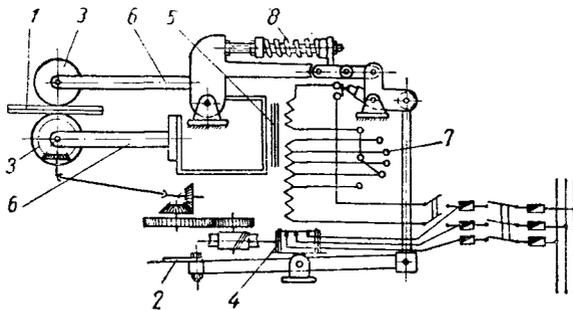
Т-образная сварка — вид контактной сварки, при котором к листу или другой детали с развитой поверхностью приваривается деталь относительно малого сечения. При этом способе сварки меньшая деталь может привариваться по всему ее сечению

ческая схема простейшей роликовой машины с pedalным приводом механизма сжатия деталей показана на фиг. 14. Свариваемые детали 1 зажимаются с помощью педали 2 между электродами 3. Нижний электрод вращается электродвигателем 4 через систему передач (цилиндрические и конические шестерни и червячный редуктор) и перемещает детали по мере их сварки. Машина имеет обычный однофазный трансформатор 5, соединенный шинами с верхним и нижним плечами 6. Регулирование мощности осуществляется секционным переключателем 7. Усилие сжатия свариваемых деталей определяется степенью деформации пружины 8.

Роликовая сварка может производиться при непрерывном перемещении свариваемых деталей и непрерывном включении сварочного тока. Это непрерывная роликовая сварка. Практическая применимость непрерывной сварки, представляющей собой наиболее простую схему процесса роликовой сварки, очень ограничена, так как при не-



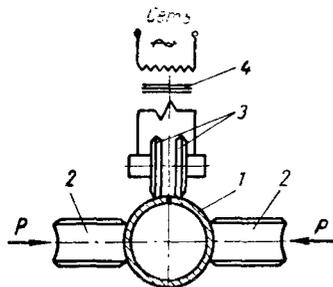
Фиг. 13. Схема (а) и примеры применения роликовой сварки (б и в).



Фиг. 14. Схема машины для роликовой сварки.

прерывной сварке сильно перегревается наружная поверхность свариваемых деталей, соприкасающаяся с электродами, что ведет к ухудшению качества сварки и к недопустимо быстрому износу электродов. Наибольшее распространение в промышленности получила прерывистая роликовая сварка, при которой детали перемещаются непрерывно, а включение сварочного тока производится отдельными импульсами длительностью от нескольких сотых долей секунды до 0,25 сек., чередующимися с паузами той же или большей длительности. Изредка применяется третий способ роликовой сварки — шаговая сварка, при которой детали перемещаются прерывисто и сварочный ток включается только

во время их остановки. При прерывистой и шаговой сварке включение и выключение сварочного тока осуществляются специальным устройством — прерывателем, от надежной работы которого в очень большой степени зависит качество сварного шва.



Фиг. 15. Схема роliko-стыковой сварки труб.

Роliko-стыковая сварка — разновидность роlikовой сварки, при которой непрерывный сварной шов образуется между кромками соединяемых встык листов. Роliko-стыковая сварка применяется в основном при изготовлении электросварных труб по схеме, изображенной на фиг. 15. Заготовка трубы 1, сформованная из листа в специальной формовочной машине, зажимается между двумя роликaми 2, сдавливающими кромки заготовки в месте стыка с некоторым усилием P . Труба перемещается под

электродами 3, подводящими сварочный ток к кромкам; электроды соединены со сварочным трансформатором 4. По мере перемещения заготовки происходит ее непрерывная сварка.

ГЛАВА II

ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ КОНТАКТНОЙ СВАРКЕ

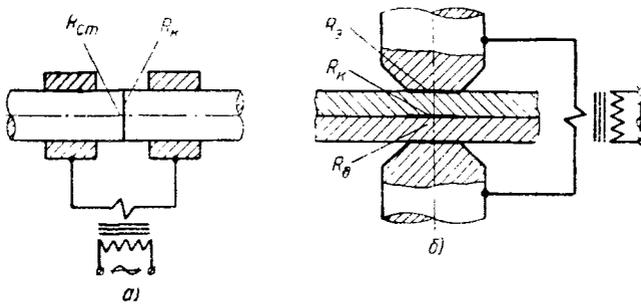
§ 1. ЗАКОН ЛЕНЦА—ДЖОУЛЯ И УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

При контактной сварке, как указывалось выше, детали нагреваются теплом, выделяемым при протекании электрического тока непосредственно в самих деталях и в переходных контактах между ними.

Общее количество тепла в малых калориях, выделяемое на участке электрической цепи с активным сопротивлением R ом при токе I а и длительности его протекания t сек., определяется по закону, впервые сформулированному русским физиком Ленцем,

$$Q = 0,24RI^2t. \quad (1)$$

При стыковой сварке (фиг. 16, а) тепло, полностью или частично используемое на полезный нагрев деталей, выделяется в контакте между



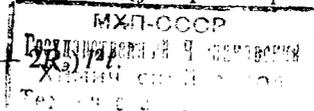
Фиг. 16. Распределение сопротивлений при стыковой (а) и точечной сварке (б).

торцами свариваемых стержней за счет контактного сопротивления R_k и в самих стержнях, имеющих собственное сопротивление R_{cm} . Для стыковой сварки формула (1) принимает вид

$$Q = 0,24 (R_k + 2R_{cm}) I^2 t. \quad (2)$$

При точечной сварке (фиг. 16, б) полезное тепло выделяется непосредственно в свариваемых деталях, имеющих собственное сопротивление R_d , в контактах между деталями с сопротивлением R_k и в контактах между деталями и электродами с сопротивлением R_θ . При сварке двух деталей формула (1) примет такой вид:

$$Q = 0,24 (2R_d + R_k + 2R_\theta) I^2 t. \quad (3)$$



В процессе сварки сопротивление и ток не остаются постоянными. Омическое сопротивление проводника постоянного сечения равно

$$R = \rho \frac{l}{F}, \quad (4)$$

где l — длина проводника в см;

F — площадь его поперечного сечения в см²;

ρ — удельное сопротивление, имеющее размерность ом·см.

Удельное сопротивление — важнейшая характеристика свариваемого материала при контактной сварке. С его увеличением в соответствии с законом Ленца — Джоуля уменьшается необходимая для сварки сила тока (при неизменной длительности процесса). Металлы и сплавы, обладающие высоким удельным сопротивлением (табл. 1), могут свариваться на машинах относительно малой мощности и, наоборот, для сварки материалов с низким удельным сопротивлением (меди, алюминия и большинства их сплавов) обычно необходимы машины большой мощности.

Таблица 1

Удельное сопротивление некоторых металлов и сплавов при $T = 20^\circ \text{C}$

Материал	Удельное сопротивление мком·см*
Алюминий	2,8
Дуралюмин Д16	3,4
Магниевый сплав МА-1	7
Малоуглеродистая сталь	12—15
Латунь Л59	7—10
Фосфористая бронза (5% олова)	9,7
Медь	1,75
Никель	9
Нихром	110
Аустенитная сталь (18% Cr и 9% Ni)	70—75
Аустенитная сталь (25% Cr и 20% Ni)	88
Быстрорежущая сталь	48

* Для определения удельного сопротивления проводника, отнесенного к 1 м длины и 1 мм² его поперечного сечения, данные таблицы необходимо умножить на 10 000.

Удельное сопротивление зависит от химического состава и температуры металла или сплава и в меньшей степени от его термической и механической обработки.

Зависимость удельного сопротивления металлов от температуры T может быть дана в следующем виде:

$$\rho_t = \rho_0 (1 + \alpha T), \quad (5)$$

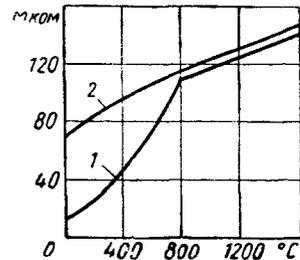
где ρ_0 — удельное сопротивление при 0°C ;

ρ_t — то же при T° ;

α — температурный коэффициент электрического сопротивления, приблизительно равный для чистых немагнитных металлов (меди, алюминия и др.) 0,004. Для стали этот коэффициент не является постоянной величиной: зависимость ρ от T дана на фиг. 17.

При комнатной температуре удельное сопротивление стали изменяется в широких пределах при изменении ее химического состава. Так, например, удельное сопротивление нержавеющей хромоникелевой аустенитной стали при $T=20^\circ\text{C}$ в 5—6 раз выше удельного сопротивления малоуглеродистой стали (фиг. 17).

Большая разница в величинах удельного сопротивления малоуглеродистой и аустенитной стали при комнатной температуре практически исчезает после нагрева до $850\text{—}900^\circ$. При этой температуре обе стали имеют одинаковую структуру (аустенит) и в связи с этим — близкие электрические свойства. Поэтому удельное сопротивление стали при комнатной температуре не является вполне точным показателем интенсивности выделения тепла при ее сварке.

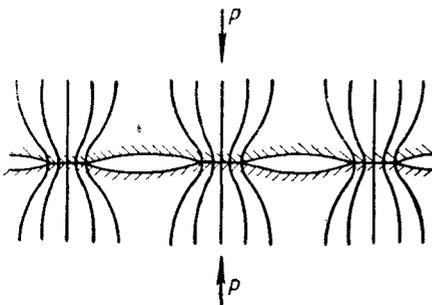


Фиг. 17. Зависимость удельного сопротивления от температуры:

1 — для малоуглеродистой стали;
2 — для нержавеющей аустенитной стали.

§ 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ КОНТАКТА

Поверхность прокатанной или механически обработанной детали (даже после шлифования) имеет довольно значительные неровности, легко видимые под микроскопом. При сжатии двух таких деталей они



Фиг. 18. Схема образования электрического контакта.

будут касаться друг друга в небольшом числе отдельных точек (фиг. 18). Площадь контакта, образующегося в каждой такой точке, и количество этих точек зависят от приложенного усилия P , сопротивления материала деталей смятию и состояния их поверхностей. Чем мягче материал и чем ровнее его поверхность, тем больше будет площадь контактов и тем меньше контактное сопротивление при неизменном усилии P .

Если через сжатые детали пропустить электрический ток, то в сопряжении между ними можно наблюдать довольно значительный перепад напряжения, указывающий на наличие большого контактного сопротивления (так как по закону Ома напряжение равно произведению сопротивления и тока). Контактное сопротивление вызывается двумя основными причинами: резким уменьшением сечения проводника вблизи контакта и наличием на поверхности деталей пленок (окислов,

грязи и т. п.) с сильно пониженной электропроводностью. С увеличением действующего в контакте усилия отдельные выступы на поверхности деталей сминаются, площадь истинного (физического) контакта между деталями растет и уменьшается контактное сопротивление. Одновременно это способствует разрушению поверхностных пленок, что, в свою очередь, ведет к понижению контактного сопротивления.

Экспериментально подтверждена следующая зависимость между контактным сопротивлением и действующим в контакте усилием:

$$R_k = \frac{r_k}{P^\alpha}, \quad (6)$$

где R_k — сопротивление контакта в $ом$;

P — усилие, действующее в контакте, в $кг$;

r_k — единичное контактное сопротивление при усилии $P = 1$ $кг$;

α — показатель степени, лежащий в пределах 0,50—1,00.

Единичное сопротивление r_k зависит от марки металла и от состояния его поверхности; оно, как правило, уменьшается для мягких металлов и материалов с высокой электропроводностью. Как видно из формулы (6), контактное сопротивление не зависит от общей площади контактирующих деталей, что подтверждается экспериментально. Показатель α изменяется для алюминиевых сплавов в пределах 0,75—0,85; для сталей — от 0,65 до 0,75. Единичное сопротивление резко изменяется в зависимости от вида металла и от состояния его поверхности: для хорошо очищенной стали r_k изменяется в пределах 0,005—0,006 $ом$; для алюминиевых сплавов — в пределах 0,001—0,002 $ом$ (при тщательной механической очистке поверхности).

Пример расчета контактного сопротивления

Требуется определить контактное сопротивление между пескоструенными холодными пластинками из малоуглеродистой стали, сжатыми силой $P = 400$ $кг$. Примем $\alpha = 0,75$ и $r_k = 0,006$. Тогда по формуле (6)

$$R_k = \frac{r_k}{P^\alpha} = \frac{0,006}{400^{0,75}} = \frac{67}{10^8} \text{ ом} = 67 \text{ мком.}$$

На фиг. 19, *а* показана зависимость сопротивления холодного контакта между очищенными стальными деталями от величины сжимающего контактного усилия P . Аналогичная зависимость при различных способах очистки поверхности листов дана на фиг. 19, *б* для дуралюмина (высокопрочного сплава алюминия, меди и магния). Из графиков следует, что с увеличением сжимающего усилия контактное сопротивление во всех случаях понижается сначала быстро, а затем медленно.

Состояние поверхности металла оказывает очень большое влияние на контактное сопротивление, что иллюстрируется для стали данными табл. 2, а для алюминиевых сплавов — фиг. 19, *б*. Следует помнить, что при неизменном способе обработки поверхности и одинаковом усилии сжатия контактное сопротивление может колебаться в относительно широких пределах (200—300%).

Таблица 2

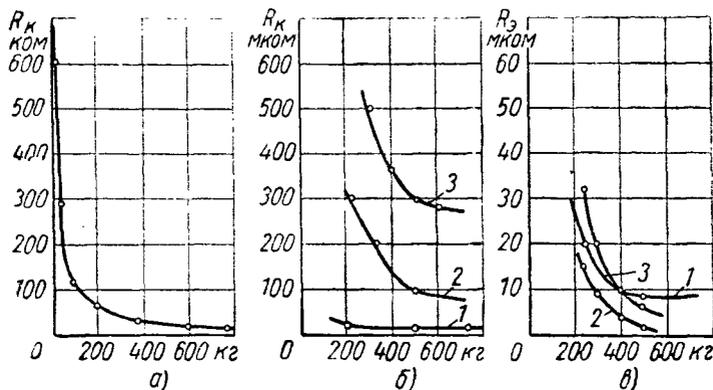
Контактное сопротивление при $T=20^{\circ}\text{C}$ между пластинами из малоуглеродистой стали толщиной 3 мм, сжатыми усилием 200 кг, при различной подготовке их поверхности (данные А. А. Сидоренко)

Вид подготовки	Сопротивление в микромах (мкОм)
Травление в кислоте	300
Очистка на наждачном круге	100
То же с последующим ржавлением	80 000
Покрытие маслом после очистки	300
Поверхность с окалиной	80 000
Поверхность с окалиной и ржавчиной	500 000
Обработка резцом	1 200
Обработка напильником	280
Шлифование	110

Контактное сопротивление между электродом (медь или ее сплав с высокой электропроводностью) и очищенной до металлического блеска стальной деталью приближенно равно:

$$R_3 = 0,5R_k \quad (7)$$

где R_k — контактное сопротивление между двумя стальными деталями при тех же условиях.

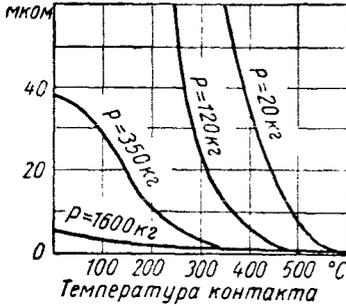


Фиг. 19. Зависимость сопротивления холодного контакта от приложенного усилия: а — для хорошо очищенной малоуглеродистой стали; б — для дуралюмина Д16Т в контакте между листами: 1 — толщиной 1,5+1,5 мм, очищенными стальной щеткой; 2 — толщиной 1,5+1,5 мм, травленными в ортофосфорной кислоте; 3 — толщиной 0,5+0,5 мм, травленными в ортофосфорной кислоте; в — между медным электродом и листом дуралюмина Д16Т: 1 — толщиной 1,5 мм, очищенным стальной щеткой; 2 — той же толщиной, травленным в ортофосфорной кислоте; 3 — толщиной 0,5 мм, травленным в ортофосфорной кислоте.

Контактное сопротивление между электродом и травленными деталями из алюминиевых сплавов может быть значительно ниже, чем $0,5R_k$,

вследствие возможного разрушения поверхностной пленки окислов в местах касания электрода с деталью. Например, по данным А. И. Пугачева, при травлении дуралюмина в ортофосфорной кислоте сопротивление R_s почти в 25 раз меньше контактного сопротивления R_k .

Сопротивление контакта очень сильно изменяется при его нагреве. Это изменение связано с двумя явлениями:



Фиг. 20. Зависимость сопротивления контакта между деталями из малоуглеродистой стали от температуры при различных значениях действующего в контакте усилия (Студер).

с увеличением удельного сопротивления прилегающего к контакту слоя металла при повышении температуры и с увеличением количества и площади отдельных контактов в результате более легкой деформации металла при его нагреве. В условиях контактной сварки увеличение площади контактов при нагреве оказывает решающее влияние на величину контактного сопротивления. При контактной сварке с повышением температуры контактное сопротивление, как правило, быстро понижается (фиг. 20). Для стальных деталей при температуре около 600° контактное сопротивление практически не зависит от сжимающего усилия и для

§ 3. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРИ СТЫКОВОЙ СВАРКЕ

обычной малоуглеродистой стали становится очень малым. Контактное сопротивление алюминиевых сплавов почти полностью исчезает при 350° . В некоторых случаях при нагреве могут разрушаться пленки окислов, что также способствует понижению контактного сопротивления.

При стыковой сварке нагрев зоны соединения определяется контактным сопротивлением между торцами деталей и сопротивлением их концов, выступающих из зажимов (см. фиг. 16, а). Контактное сопротивление зависит от метода стыковой сварки. При сварке по методу сопротивления детали сжимаются достаточно большим усилием, и контактное сопротивление (относительно малой величины) может быть легко вычислено по формуле (6) или найдено по соответствующим графикам. В практических расчетах при нагреве деталей выше 600 — 800° этим сопротивлением можно пренебречь.

При стыковой сварке оплавлением (см. гл. I) электрический контакт между нагреваемыми деталями осуществляется перемычками расплавленного металла, имеющими в средней части относительно малое сечение. Контактное сопротивление при сварке оплавлением выше, чем при сварке сопротивлением, и обычно лежит в пределах 100 — 400 мком (для стальных деталей). Это сопротивление уменьшается с увеличением числа одновременно существующих перемычек и их размеров. Размеры перемычек увеличиваются с увеличением сечения свариваемых деталей и скорости оплавления (скорости сближения

деталей при оплавлении). Число одновременно существующих перемычек растет с увеличением сечения деталей.

Контактное сопротивление при сварке оплавлением (в *мком*) можно определять по эмпирической формуле

$$R_{\text{онт}} = \frac{k_1 \cdot 9500}{F^{\frac{2}{3}} v^{\frac{1}{3}} j}, \quad (8)$$

где F — площадь сечения свариваемых деталей в см^2 ;

v — скорость оплавления в см/сек ;

j — плотность тока в а/мм^2 ;

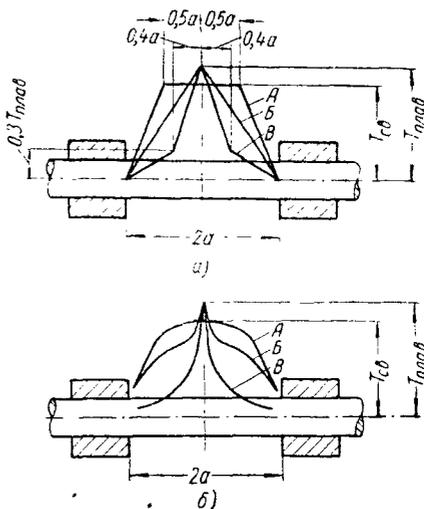
k_1 — коэффициент, учитывающий свойства оплавляемой стали (для углеродистых и легированных конструкционных сталей $k_1 = 1$; для аустенитных сталей $k_1 = 1,1$).

Плотность тока в формуле (8) определяется делением сварочного тока I_2 на площадь сечения свариваемых деталей F .

Сопротивление выступающих из зажимов концов деталей определяется по формуле (4) с учетом неравномерного распределения температуры по длине деталей. К концу нагрева по методу сопротивления распределение температуры можно приблизительно принимать по ломаной линии A на фиг. 21, *а*. При сварке оплавлением с предварительным подогревом можно пользоваться распределением температуры B и, наконец, при сварке оплавлением без подогрева — распределением температуры B (фиг. 21). Действительное распределение температуры для этих трех случаев показано на фиг. 21, *б*.

Переменный ток, протекающий в проводнике, в особенности в проводнике из магнитного материала, в результате его взаимодействия с создаваемым этим током магнитным полем отгесняется к наружной поверхности проводника. Это явление в электротехнике называется поверхностным эффектом. Следствием поверхностного эффекта является увеличение активного (а также индуктивного) сопротивления

проводника по сравнению с его омическим сопротивлением, т. е. сопротивлением при протекании в проводнике постоянного тока. При стыковой сварке заметное влияние поверхностного эффекта на сопротивление холодных деталей из магнитной стали (например, малоуглеродистой стали) возможно при их диаметре более 20—25 мм. При



Фиг. 21. Распределение температуры вдоль нагреваемых заготовок при стыковой сварке:

а — расчетная схема; *б* — действительное распределение; *A* — сварка [методом сопротивления]; *B* — сварка оплавлением с подогревом; *B* — сварка оплавлением без подогрева.

диаметре 40 мм сопротивление растет примерно на 50%, а при диаметре 60 мм — почти на 150% по сравнению с омическим сопротивлением тех же деталей. Следует иметь в виду, что при нагреве железа выше 768° (точка Кюри) оно теряет свои ферромагнитные свойства. В результате этого в горячих деталях влияние поверхностного эффекта мало, и в практических расчетах им можно пренебрегать. Расчет сопротивлений при стыковой сварке сопротивлением и оплавлением иллюстрируется приведенным ниже примером.

Пример расчета сопротивления при стыковой сварке

Требуется определить сопротивление в начале и в конце процесса, а также среднее расчетное сопротивление, при сварке сопротивлением и оплавлением круглых стержней из малоуглеродистой стали сечением 400 мм² (диаметр 22 мм) при установочной длине каждого стержня (длине его части, выступающей из электродов стыковой машины), равной 25 мм. Оплавление ведется со скоростью 0,2 см/сек при плотности тока 18 а/мм².

При сварке сопротивлением действующее усилие осадки равно 400 кг. При этом температуру в стыке в конце сварки $T_{св} = 1250^\circ$. В начале процесса при холодных деталях контактное сопротивление по графику на фиг. 19, а для $P = 400$ кг равно:

$$R_{\kappa} = 30 \text{ мком.}$$

Собственное сопротивление стержней по формуле (4) при $\rho_0 = 13,5 \text{ мком}\cdot\text{см}$ (табл. 1, среднее значение для малоуглеродистой стали) равно для холодных деталей (при диаметре стержней меньше 30 мм поверхностным эффектом пренебрегаем):

$$2R_{ст} = \rho_0 \frac{2l}{F} = 13,5 \frac{5}{4} = 17 \text{ мком.}$$

Общее сопротивление в начале сварки

$$R = 17 + 30 = 47 \text{ мком.}$$

К концу сварки сопротивление контакта $R_{\kappa} = 0$. Средняя температура стержней на участке, выступающем из губок (электродов), может быть приближенно найдена по схеме А на фиг. 21, а. Эта температура равна 0,75 $T_{св} = 935^\circ$. Удельное сопротивление малоуглеродистой стали при этой температуре по графику на фиг. 17 составляет 116 мком·см, тогда

$$2R_{ст} = 116 \frac{2 \cdot 2,5}{4} = 145 \text{ мком.}$$

Среднее расчетное сопротивление

$$R = \frac{47 + 145}{2} = 96 \text{ мком.}$$

При сварке оплавлением круглых стержней из малоуглеродистой стали контактное сопротивление по формуле (8)

$$R_{опл} = \frac{9500 \cdot 1}{2 \cdot \frac{1}{4^3} \cdot 0,2^3 \cdot 18} = \frac{9500}{2,52 \cdot 0,58 \cdot 18} = 360 \text{ мком.}$$

К концу сварочного нагрева температура в стыке достигнет 1500°. Средняя температура выступающих концов стержней при сварке оплавлением с подогревом (линия Б на фиг. 21, а) приближенно равна $T_{ср} = 0,50 T_{плав} = 750^\circ$. При этой температуре удельное сопротивление малоуглеродистой стали (фиг. 17)

составляет 100 $\mu\text{ком} \cdot \text{см}$. Собственное сопротивление стержней к концу сварки оплавлением (с подогревом)

$$2R_{ст} = \rho_t \frac{2l}{F} = 100 \frac{2 \cdot 2,5}{4} = 125 \mu\text{ком}$$

Общее сопротивление к концу процесса оплавления

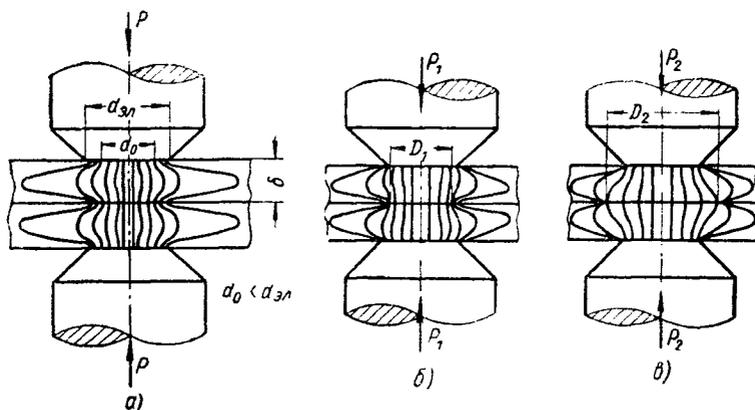
$$R = 125 + 360 = 485 \mu\text{ком}.$$

Общее сопротивление в момент осадки стыка резко снизится и будет равно собственному сопротивлению нагретых стержней (в данном случае 125 $\mu\text{ком}$).

Из анализа полученных цифр можно сделать два существенных вывода: а) при стыковой сварке оплавлением общее сопротивление значительно выше, чем при сварке методом сопротивления, и б) при сварке методом сопротивления значение собственного сопротивления по сравнению с контактным велико, а при сварке оплавлением оно относительно мало.

§ 4. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРИ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКЕ

Как указывалось в § 1, сопротивление при точечной сварке складывается из контактных сопротивлений (см. § 2) и из собственного сопротивления свариваемых деталей. В начальный момент точечной сварки через холодные детали ток протекает в соответствии со схемой

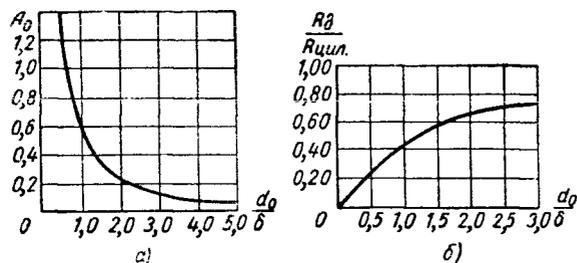


Фиг. 22. Схема поля электрического тока при точечной сварке:

а — в начале процесса (детали холодные); б — к концу процесса при приложении к электродам умеренного усилия P_1 ; в — к концу процесса при значительном усилии P_2 .

фиг. 22, а, которая изображает так называемое поле электрического тока. Кривые линии на схеме совпадают с направлением электрического тока в любой точке поля, а их густота характеризует его плотность, а именно, чем ближе расположены линии, тем больше плотность тока. Как правило, электрод касается холодных деталей не по всей его рабочей поверхности, а на некоторой площадке, расчетный диаметр которой d_0 (фиг. 22, а) зависит от величины усилия P и твердости свариваемого и электродного металла. С увеличением усилия P

и с уменьшением твердости растет площадь контакта и увеличивается диаметр d_0 . Теоретическое изучение поля электрического тока, представленного на фиг. 22, позволяет вычислить собственное омическое сопротивление свариваемых деталей в зависимости от толщины, механических свойств и удельного сопротивления металла и от величины действующего в контакте усилия P . При этом следует иметь в виду, что поле, ограниченное двумя соосными круглыми контактами одинакового диаметра, является только упрощенной расчетной схемой. В действительности контакт между холодными деталями осуществляется лишь



Фиг. 23. График коэффициента A_0 для определения собственного сопротивления деталей при точечной сварке (а) и зависимость отношения действительного сопротивления пластинки R_δ к сопротивлению цилиндрического столбика $R_{цил}$ от геометрических размеров свариваемой точки (б).

A_0 — коэффициент, зависящий от отношения $\frac{d_0}{\delta}$ (фиг. 23, а).

Сопротивление R_δ , найденное с учетом особенностей поля тока, может существенно отличаться от омического сопротивления ($R_{цил}$) столбика металла диаметром d_0 и высотой δ ($R_\delta < R_{цил}$). Отношение $\frac{R_\delta}{R_{цил}}$ в зависимости от $\frac{d_0}{\delta}$ показано графически на фиг. 23, б.

Величина d_0 , необходимая для расчета омического сопротивления пластинки по формуле (9), определяется из отношения:

$$d_0 = \sqrt{\frac{4P}{\pi\sigma_c}}, \quad (10)$$

где P — усилие, сжимающее контакт, в кг;

σ_c — сопротивление металла смятию в кг/см².

Для холодных деталей из малоуглеродистой стали при медных электродах можно принять $\sigma_c = 4000$ кг/см².

При нагреве во время сварки собственное сопротивление деталей изменяется по сложному закону: с одной стороны, оно должно расти из-за повышения удельного сопротивления металла, а с другой стороны, оно должно уменьшаться вследствие увеличения контактной поверхности (при нагреве облегчается пластическая деформация металла). В начальной стадии нагрева собственное сопротивление деталей обычно

в отдельных точках, расположенных наиболее плотно в пределах круга диаметром d_0 .

Действительное сопротивление одной из пластинок, изображенных на фиг. 22, а, может быть найдено по формуле

$$R_\delta = A_0 \frac{\rho_0}{\delta}, \quad (9)$$

где ρ_0 — удельное сопротивление металла пластинки в ом·см;

δ — толщина пластинки в см;

несколько возрастает, а затем, как правило, более или менее быстро понижается. К концу сварки касание электрода с деталью осуществляется по всей его рабочей поверхности. Диаметр расчетного контакта между нагретыми деталями можно приблизительно определить и в этом случае по формуле (10), принимая для малоуглеродистой стали $\sigma'_c = 450 \text{ кг/см}^2$.

Собственное сопротивление деталей к концу точечной сварки определяется формулой

$$R'_0 = A_0 k \frac{\rho_t}{\delta}, \quad (11)$$

где ρ_t — удельное сопротивление, соответствующее средней температуре деталей в зоне протекания сварочного тока (в конце сварки для стали ρ_t может быть принято, исходя из $T = 1200 \div 1300^\circ$); k — коэффициент, меньший единицы (0,8—0,9), учитывающий некоторое понижение сопротивления деталей вследствие возможного протекания части тока через относительно холодные участки металла рядом со свариваемой точкой, обладающие меньшим удельным сопротивлением.

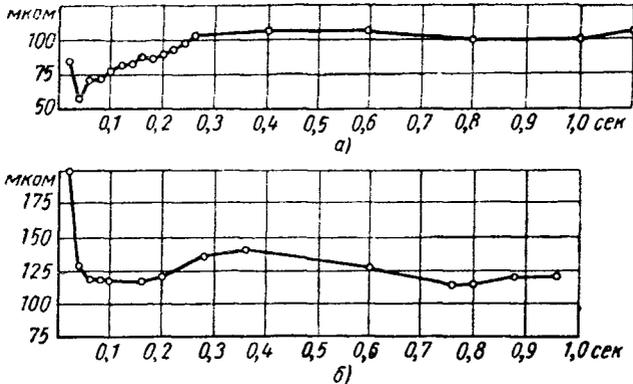
Коэффициент A_0 , как и в формуле (9), находится по графику на фиг. 23 в зависимости от отношения $\frac{d_0}{\delta}$. В первом приближении d_0 определяется как среднее для контакта между свариваемыми деталями и между деталью и электродом.

С увеличением действующего усилия увеличивается площадь контакта между свариваемыми деталями ($D_2 > D_1$). В силу этого собственное сопротивление деталей уменьшается даже при неизменных размерах электродов. Изменение поля тока при увеличении усилия иллюстрируется фиг. 22, б и в ($P_2 > P_1$).

При точечной сварке магнитных сталей (например, обычной малоуглеродистой) имеется поверхностный эффект. Однако в силу очень большой плотности тока его влияние при точечной сварке относительно невелико, и им можно пренебречь. Детали из таких сталей, попадая при сварке во вторичный контур машины и оказываясь, таким образом, в сфере действия сильного магнитного поля, создаваемого электрическим током, перемagnичиваются (с частотой 50·гц) и, кроме того, в них индуктируются вихревые токи. В результате этого, с одной стороны, происходит бесполезный нагрев деталей вне места их сварки и, с другой стороны, увеличивается активное и реактивное сопротивление контура машины. Влияние магнитного материала на сопротивление вторичного контура рассмотрено в § 1 гл. IX.

Как указывалось выше, общее сопротивление при точечной сварке складывается из собственного и контактных сопротивлений. При сварочном нагреве деталей контактные сопротивления понижаются, а собственное вначале растет, а потом также уменьшается. Характер изменения общего сопротивления во время точечной сварки (фиг. 24, а и б) зависит от свойств свариваемого материала, толщины деталей и сжимающего

усилия. Так как контактное сопротивление уменьшается очень быстро, в особенности при сварке легких сплавов (например, дуралюмина), то основное значение при точечной сварке имеет собственное сопротивление. Например, из общего количества тепла, выделяемого при точечной сварке стали в соответствии с формулой (3), не более 5—10% генерируется за счет контактных сопротивлений. Среднее расчетное значение общего сопротивления при точечной сварке может определяться, как сопротивление деталей в конце сварочного нагрева, умноженное на коэффициент, равный 1,25 (для стали).



Фиг. 24. Изменение общего сопротивления деталей при сварке одной точки:

а — малоуглеродистая сталь толщиной 3,8 мм при $P=800$ кг;
б — аустенитная сталь 1X18H9T толщиной 4,2 мм при $P=800$ кг.

С увеличением приложенного к электродам усилия общее сопротивление деталей (см. фиг. 19) из-за уменьшения их собственного и контактного сопротивления уменьшается, вследствие чего с ростом усилия падает интенсивность выделения тепла в зоне сварки. Методика расчета сопротивлений при точечной сварке иллюстрируется приведенным ниже примером. Формулы для расчета сопротивлений при точечной сварке могут быть использованы также для приближенных расчетов сопротивлений при рельефной и роликовой сварке.

Пример расчета сопротивления при точечной сварке

Требуется определить общее сопротивление при точечной сварке двух деталей из малоуглеродистой стали толщиной $\delta=4,0$ мм каждая; усилие, приложенное к электродам, $P=800$ кг, диаметр контактной поверхности электрода $d_0=12$ мм.

Расчетный диаметр холодных контактов по формуле (10), полагая $\sigma_c = 4000$ кг/см², равняется

$$d_0 = \sqrt{\frac{4P}{\pi\sigma_c}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 800}{3,14 \cdot 4000}} = 0,5 \text{ см.}$$

При этом $\frac{d_0}{\delta} = \frac{0,5}{0,4} = 1,25$ и по графику на фиг. 23, а $A_0 = 0,42$. При $r_0 = 13,5$ *мком·см* формула (9) дает

$$R_{\sigma} = A_0 \frac{r_0}{\delta} = \frac{0,42 \cdot 13,5}{0,4} = 14 \text{ мком.}$$

Для малоуглеродистой стали при $P = 800$ *кг* по графику фиг. 19, а контактное сопротивление холодных деталей равно $R_k = 15$ *мком*. При хорошо очищенных стальных деталях и медных электродах сопротивление контакта электрод — деталь при этом составит $R_g = 0,5$, $R_k = 7,5$ *мком*. Общее сопротивление холодных деталей в начале сварки

$$R_{хол} = 2 \cdot 14 + 15 + 2 \cdot 7,5 = 58 \text{ мком.}$$

К концу сварки расчетный диаметр контакта электрод — деталь принимаем равным рабочему диаметру электрода, тогда $d_1 = d_g = 1,2$ *см*.

Расчетный диаметр контакта между деталями к концу сварки находим по формуле (10), полагая $\sigma_c = 450$ *кг/см²*, тогда

$$d_2 = \sqrt{\frac{4P}{\pi\sigma_c}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 800}{3,14 \cdot 450}} = 1,5 \text{ см.}$$

Среднее значение расчетного диаметра контакта

$$d_{cp} = \frac{1,2 + 1,5}{2} = 1,35 \text{ см.}$$

По графику на фиг. 23, а для $\frac{d_0}{\delta} = \frac{1,35}{0,4} = 3,38$ находим значение $A_0 = 0,1$. Принимая в формуле (11) $k = 0,85$ и $r_l = 135$ *мком·см*, найдем

$$R_{\sigma} = 0,1 \cdot 0,85 \frac{135}{0,4} = 29 \text{ мком.}$$

К концу сварки контактные сопротивления R_k и R_g практически равны 0, поэтому общее сопротивление составит

$$R_{гор} = 2 R_{\sigma, гор} = 2 \cdot 29 = 58 \text{ мком.}$$

§ 5. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Теплопроводность металла (или сплава) λ и его теплоемкость c оказывают очень существенное влияние на нагрев и распространение тепла при сварке. Теплопроводность в физической системе единиц имеет размерность *кал/см·сек °С*; в электрической системе единиц теплопроводность измеряется в *вт/см °С*.

Теплоемкость измеряется в *кал/г °С* в физической системе единиц и в *вт·сек/г °С* — в электрической. В табл. 3 приведены значения теплопроводности и теплоемкости при комнатной температуре, а также удельные веса и температуры плавления для некоторых металлов и сплавов, с которыми наиболее часто приходится встречаться при контактной сварке. В этой же таблице даны значения коэффициента температуропроводности, характеризующего скорость распространения температуры в неравномерно нагретом теле. Коэффициент температуропроводности равен $a = \frac{\lambda}{c\gamma}$ и измеряется в *см²/сек*. Как видно

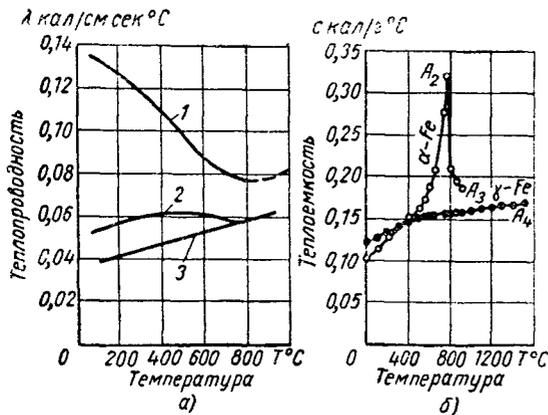
из табл. 3, теплопроводность малоуглеродистой стали в 6—8 раз ниже, чем у меди. Теплопроводность хромоникелевой нержавеющей стали почти в 3 раза ниже теплопроводности малоуглеродистой стали (эти соотношения справедливы только при комнатной температуре и могут сильно изменяться при нагреве в процессе сварки).

Таблица 3

Теплофизические свойства некоторых металлов и сплавов при $T=20^\circ$

Наименование материала	Теплопроводность в кал/см·сек °С	Теплоемкость в кал/г·°С	Удельный вес в г/см ³	Температура плавления в °С	Температура про- водности в см ² /сек
Медь	0,86	0,092	8,9	1083	1,05
Алюминий	0,49	0,21	2,71	658	0,73
Дуралюмин Д16	0,32 - 0,35	0,20	2,80	648	0,62
Магниевый сплав МА-1	0,20—0,30	0,25	1,80	690	0,44—0,66
Латунь Л59	0,14—0,22	0,09	8,4—8,7	930	0,18—0,27
Фосфористая бронза . .	0,12	0,087	8,9	1050	0,15
Малоуглеродистая сталь	0,11—0,15	0,11	7,85	1530	0,15
Нихром	0,03	0,11	8,17	1375	0,033
Аустенитная сталь (18% Cr и 9% Ni)	0,044	0,11	7,86	1440	0,05
Аустенитная сталь (25% Cr и 20% Ni)	0,033	0,11	7,9	1430	0,038

Теплофизические свойства металлов и сплавов сильно изменяются с изменением температуры. На



Фиг. 25. Зависимость теплофизических свойств сталей от температуры:

а — изменение теплопроводности малоуглеродистой (1), быстрорежущей (2) и аустенитной стали 1X18H9T (3); б — истинная теплоемкость α -железа и γ -железа (малоуглеродистая и аустенитная сталь).

фиг. 25, а показано изменение теплопроводности малоуглеродистой (1), быстрорежущей (2) и аустенитной стали (3) в интервале температур от 20 до 900° . Ход кривых для сталей различного химического состава совершенно различен: теплопроводность малоуглеродистой стали уменьшается до температуры порядка 800° . С переходом в аустенит теплопроводность стали вновь начинает расти. Теплопроводность высоколегированных сталей значительно ниже, чем мало-

углеродистой, и с повышением температуры медленно растёт. Зависимость теплоемкости малоуглеродистой и аустенитной стали (содержащей около 18% Сг и 9% Ni) от температуры представлена на фиг. 25, б. Пик на кривой теплоемкости малоуглеродистой стали связан с поглощением тепла при потере сталью магнитных свойств (в точке Кюри). Немagnetная нержавеющая сталь этого пика не имеет.

Теплопроводность меди и алюминия, как и теплопроводность других чистых металлов, растёт с повышением температуры.

§ 6. ОСОБЕННОСТИ НАГРЕВА ПРИ КОНТАКТНОЙ СВАРКЕ

При контактной сварке тепло Q , выделяемое при протекании электрического тока, расходуется на полезный нагрев деталей в месте сварки и непосредственно прилегающей к нему зоне ($Q_{пол}$) и частично используется для компенсации потерь тепла в электроды, в окружающий холодный металл деталей и в атмосферу ($Q_{пот}$).

Количества выделенного и израсходованного тепла всегда равны между собой, что выражается уравнением баланса тепла, в общем случае имеющим вид

$$Q = Q_{пол} + Q_{пот}. \quad (12)$$

Тепло $Q_{пол}$ определяется объемом и температурой металла в зоне сварки, а также его теплофизическими свойствами (теплоемкостью), но не зависит от длительности нагрева. Действительно, для нагрева (без потерь тепла) тела объемом $V \text{ см}^3$ до температуры T° при удельном весе $\gamma \text{ г/см}^3$ и теплоемкости $c \text{ кал/г}^\circ\text{C}$ потребуется

$$Q_{пол} = V\gamma cT \text{ кал}. \quad (13)$$

Потери тепла растут с увеличением длительности нагрева. В связи с этим общее количество тепла Q (фиг. 26, а), необходимое для сварки, также растёт с увеличением длительности сварочного процесса t .

Повышение теплопроводности также ведет к резкому увеличению потерь тепла.

Количество тепла q , выделяемое (и потребляемое) в единицу времени (секунду), в среднем равно

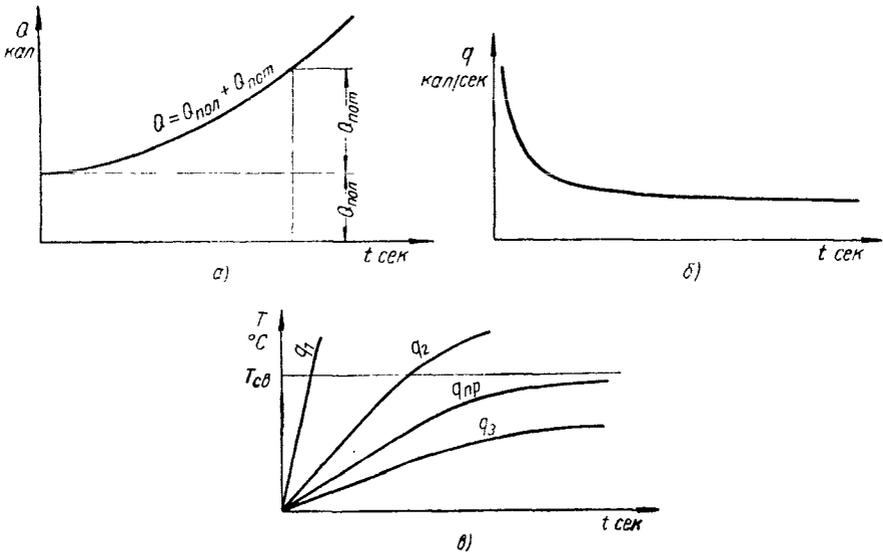
$$q = \frac{Q}{t} \text{ кал/сек}. \quad (14)$$

Величина q определяет мощность, расходуемую в зоне сварки (остальная мощность теряется в самой сварочной машине на нагрев трансформатора и токоведущих элементов сварочной цепи). Эта мощность может быть выражена как в тепловых (кал/сек), так и в электрических единицах (ваттах).

С увеличением длительности нагрева необходимая для сварки деталей мощность сначала быстро, а затем медленно уменьшается (фиг. 26, б).

Закон нарастания температуры в зоне сварки зависит от потребляемой здесь мощности. При относительно большой мощности q_1 (фиг. 26, в)

температура растет почти по линейному закону, быстро достигая необходимого для осуществления сварки значения $T_{св}$. С уменьшением мощности скорость нарастания температуры снижается. При некоторой предельной мощности $q_{пр}$ требуемая температура $T_{св}$ может быть достигнута лишь по прошествии очень большого промежутка времени. Наконец, при $q_3 < q_{пр}$ нагреть детали до заданной температуры вообще нельзя — сварка в этом случае неосуществима.



Фиг. 26. Типовые зависимости необходимого для сварки расхода тепла (а), потребляемой при сварке мощности (б) и температуры в зоне сварки (в) от длительности нагрева.

Мощность, необходимая для контактной сварки данных деталей, не является постоянной величиной: она уменьшается с удлинением процесса нагрева, но не может стать меньше предельного значения $q_{пр}$. С уменьшением мощности растет длительность сварки и уменьшается производительность труда. Количественная связь между длительностью нагрева, температурой и мощностью устанавливается тепловыми расчетами, основанными на законе Ленца—Джоуля и на уравнении теплопередачи. С помощью тепловых расчетов в теории контактной сварки решаются три основные задачи, из которых первые две имеют наибольшее практическое значение:

а) при заданной длительности процесса (например, задано число сварок в час или в смену) определить общее количество тепла и мощность, необходимые для осуществления этого процесса (т. е. определить мощность необходимого оборудования);

б) при заданной мощности (для выполнения работы может быть использована машина ограниченной мощности) определить минимальную длительность сварки, т. е. производительность процесса;

в) найти закон изменения температуры в процессе сварки.

Точное решение задач по нагреву при контактной сварке представляет значительные трудности вследствие: а) изменения в процессе сварки величины и распределения источников тепла (интенсивность выделения тепла пропорциональна сопротивлению; как собственное, так и контактное сопротивление при сварке изменяются в широких пределах; к концу нагрева последнее часто падает до нуля); б) непостоянства теплофизических свойств свариваемых металлов и сплавов (например, теплопроводность малоуглеродистой стали при нагреве до 800° понижается почти в 3 раза по сравнению с ее значением при комнатной температуре из-за одновременного понижения теплопроводности λ (фиг. 25, а) и роста теплоемкости c (фиг. 25, б); в) из-за сложности условий теплоотвода. Поэтому при анализе тепловых процессов контактной сварки делаются те или иные упрощающие допущения, с помощью которых удается получить только приближенное решение задачи. Это решение, как правило, должно корректироваться имеющимися данными практики или в отдельных случаях специальными контрольными опытами.

§ 7. НАГРЕВ ПРИ СТЫКОВОЙ СВАРКЕ

Условия нагрева при стыковой сварке сопротивлением и оплавлением принципиально не отличаются: в обоих случаях тепло выделяется как в контакте между свариваемыми деталями, так и в самих деталях. Однако при сварке сопротивлением количество тепла, выделяемого в контакте, относительно невелико и по мере разогрева быстро уменьшается (так как при нагреве контактное сопротивление резко уменьшается), а при сварке оплавлением количество тепла, генерируемого в контакте, относительно велико и мало изменяется в процессе нагрева, так как сопротивление расплавленных перемычек стали практически одинаково на всем протяжении процесса.

Температура в стыке при сварке сопротивлением может быть найдена как результат совместного действия тепла, выделяемого в свариваемых деталях и в контакте между ними. Если детали сечением $F \text{ см}^2$ с удельным весом $\gamma \text{ г/см}^3$, теплоемкостью $c \text{ кал/г}^\circ\text{С}$ и средним удельным сопротивлением $\rho_t \text{ ом}\cdot\text{см}$ нагреваются в течение t сек. током $I_2 \text{ а}$, то на 1 см длины деталей за время t выделится

$$Q = 0,24\rho_t \frac{1}{F} I_2^2 t \text{ кал.} \quad (15)$$

Это тепло будет затрачено на нагрев деталей и на потери, связанные с его отводом в губки и с лучеиспусканием. Учитывая эти потери введением коэффициента k_2 , получим

$$k_2 Q = F \cdot 1 \cdot \gamma c T_1, \quad (16)$$

где T_1 — температура нагрева деталей непосредственно выделяемым в них теплом. При сварке малоуглеродистой и других конструкционных сталей коэффициент k_2 близок к 0,75. При сварке аустенитных сталей, имеющих относительно низкую теплопроводность, $k_2 \approx 0,90$.

Решая совместно уравнения (15) и (16), находим формулу для определения T_1 :

$$T_1 = \frac{0,24k_2\rho_t I_2^2 t}{\gamma c F^2}. \quad (17)$$

Тепло, выделяемое непосредственно в стыке, нагревает металл торцов до температуры

$$T_2 = \frac{q_{cp} \sqrt{t}}{F \sqrt{\pi \gamma c \lambda}}, \quad (18)$$

где q_{cp} — среднее количество тепла (кал/сек), выделяемое в секунду, в контакте между деталями во время сварки;

λ — коэффициент теплопроводности в кал/см·сек °С (остальные обозначения соответствуют принятым в предыдущих формулах).

Величина q_{cp} вычисляется по формуле

$$q_{cp} = 0,24m_1 I_2^2 R_k, \quad (19)$$

где R_k — контактное сопротивление в начале сварки в ом;

m_1 — коэффициент, учитывающий изменение контактного сопротивления в процессе нагрева стыка (приближенно $m_1 = 0,4$);

I_2 — сварочный ток в а.

Окончательно температура в стыке при сварке сопротивлением

$$T = T_1 + T_2 = \frac{0,24k_2\rho_t I_2^2 t}{c\gamma F^2} + \frac{0,24m_1 R_k I_2^2 \sqrt{t}}{F \sqrt{\pi \gamma c \lambda}}. \quad (20)$$

Уравнение (20) может быть использовано и для определения необходимого для сварки тока (тока, необходимого для нагрева до $T = T_{cs}$)

$$I_2 = \sqrt{\frac{T_{cs}}{\frac{0,24k_2\rho_t t}{c\gamma F^2} + \frac{0,24m_1 R_k \sqrt{t}}{F \sqrt{\pi \gamma c \lambda}}}}. \quad (21)$$

Это же уравнение может быть решено относительно t , что позволяет определить необходимую длительность сварочного нагрева в том случае, когда известны все остальные параметры процесса. При сварке сопротивлением средние значения удельного сопротивления ρ_t для малоуглеродистой и низколегированной стали равны 48 мком·см, для аустенитной стали — 96 мком·см.

Практически при заданной плотности тока нагрев идет тем интенсивнее, чем ниже теплопроводность материала деталей, чем больше их диаметр (уменьшаются потери тепла от лучеиспускания) и чем больше их установочная длина (уменьшаются потери тепла в электроды).

Для приближенных расчетов при сварке сопротивлением круглых стержней из стали и цветных металлов могут быть использованы предложенные К. А. Кочергиным эмпирические формулы, связывающие плотность тока j (а/см²) с длительностью нагрева t_{cs} . Эти формулы имеют вид

$$j \sqrt{t} = K \cdot 10^8. \quad (22)$$

Коэффициент K зависит от свойств свариваемого металла, сечения деталей и их установочной длины (таб. 4). Из сопоставления значений K , в частности, следует, что при равной длительности процесса плотность тока при сварке медных деталей должна быть приблизительно в 3 раза выше, чем при сварке стальных деталей (для меди $K = 27$, а для малоуглеродистой стали $K = 8 \div 10$).

Таблица 4

Значения K при определении параметров процесса сварки сопротивлением по формуле $j\sqrt{t} = K \cdot 10^3$ (К. А. Кочергии)

Свариваемый металл	Установочная длина (d —диаметр круглого стержня)	Диаметр стержней в мм	Коэффициент K
Малоуглеродистая сталь	d	4 - 10	10
Малоуглеродистая сталь	$(0,7 \div 1,0)d$	10—40	8
Медь	$2d$	—	27
Латунь	$1,5d$	—	20
Алюминий	$1,5d$	—	12—15

Примеры теплового расчета при стыковой сварке сопротивлением

1. Требуется определить температуру в стыке при сварке сопротивлением стержней из малоуглеродистой стали сечением 400 мм^2 (установочная длина каждого стержня 25 мм, усилие осадки 400 кг). Длительность нагрева $t = 12$ сек. при силе тока $I_2 = 12000 \text{ а}$.

Начальное сопротивление контакта между холодными деталями $R_k = = 30 \text{ мком} = 30 \cdot 10^{-6} \text{ ом}$ (см. пример на стр 24). Для малоуглеродистой стали принимаем следующие средние значения: $\lambda = 0,1 \text{ кал/см} \cdot \text{сек} \text{ } ^\circ\text{С}$, $c = 0,15 \text{ кал/г} \text{ } ^\circ\text{С}$ и $\rho_t = 48 \cdot 10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{см}$.

Температура к концу нагрева определится по формуле (20)

$$T = T_1 + T_2 = \frac{0,24 \cdot 0,75 \cdot 48 \cdot 10^{-6} \cdot 12000^2 \cdot 12}{0,15 \cdot 7,85 \cdot 4^2} + \frac{0,24 \cdot 0,4 \cdot 30 \cdot 10^{-6} \cdot 12 \cdot (0,02 \sqrt{12})}{4 \sqrt{3,14 \cdot 7,85 \cdot 0,15 \cdot 0,10}} = = 710 + 600 = 1310^\circ \text{С}.$$

2. Определить минимальную мощность стыковой машины, необходимую для сварки сопротивлением стержней из малоуглеродистой стали диаметром 10 мм с производительностью 600 сварок в час. Известно, что вспомогательное время, необходимое для установки, зажатия и снятия деталей с машины, составляет 4 сек.

Длительность одного полного цикла сварки

$$t_c = \frac{3600}{600} = 6 \text{ сек.}$$

При заданной производительности максимальная возможная длительность сварочного нагрева

$$t_{св} = 6 - 4 = 2 \text{ сек.}$$

Примем, что усилие осадки равно 150 кг. При таком усилии сопротивление холодного контакта $R_k = 80 \text{ мком}$.

*

Необходимая сила тока для нагрева до температуры сварки (принимаяем $T_{св} = 1250^\circ \text{C}$) определяется по формуле (21) (значения теплофизических характеристик такие же, как в предыдущем примере). Тогда

$$I_2 = \sqrt{\frac{1250}{\frac{0,24 \cdot 0,75 \cdot 48 \cdot 10^{-6} \cdot 2}{0,15 \cdot 7,85 \cdot 0,78^2} + \frac{0,24 \cdot 0,40 \cdot 80 \cdot 10^{-6} \sqrt{2}}{0,78 \sqrt{3,14 \cdot 7,85 \cdot 0,15 \cdot 0,10}}}} =$$

$$= \sqrt{\frac{1250 \cdot 10^6}{24,6 + 22,7}} = 5150 \text{ а.}$$

Зная необходимую силу тока, можно, пользуясь справочными данными, подобрать машину соответствующей мощности. Принимая в первом приближении напряжение во вторичной цепи машины для рассматриваемого случая равным 2,3 в, получим мощность около 12 ква.

3. На стыковой машине мощностью 50 ква (максимальный сварочный ток 15 000 а) необходимо сваривать встык сопротивлением стержни из малоуглеродистой стали сечением 400 мм². Требуется определить максимальную возможную производительность процесса при условии, что вспомогательное время сварки составляет 8 сек.

Для этого случая $R_k = 30 \cdot 10^{-6}$ ом. Подставляя все величины в формулу (20), получим квадратное уравнение относительно t

$$1250 = \frac{0,24 \cdot 0,75 \cdot 48 \cdot 10^{-6} \cdot 15000t}{0,15 \cdot 7,85 \cdot 42} + \frac{0,24 \cdot 0,40 \cdot 30 \cdot 10^{-6} \cdot 15000^2 \sqrt{t}}{4 \cdot 3,14 \cdot 7,85 \cdot 0,15 \cdot 0,10}$$

или

$$1250 = 103t + 270 \sqrt{t},$$

откуда $\sqrt{t} = 2,4$ и $t = 5,8$ сек.

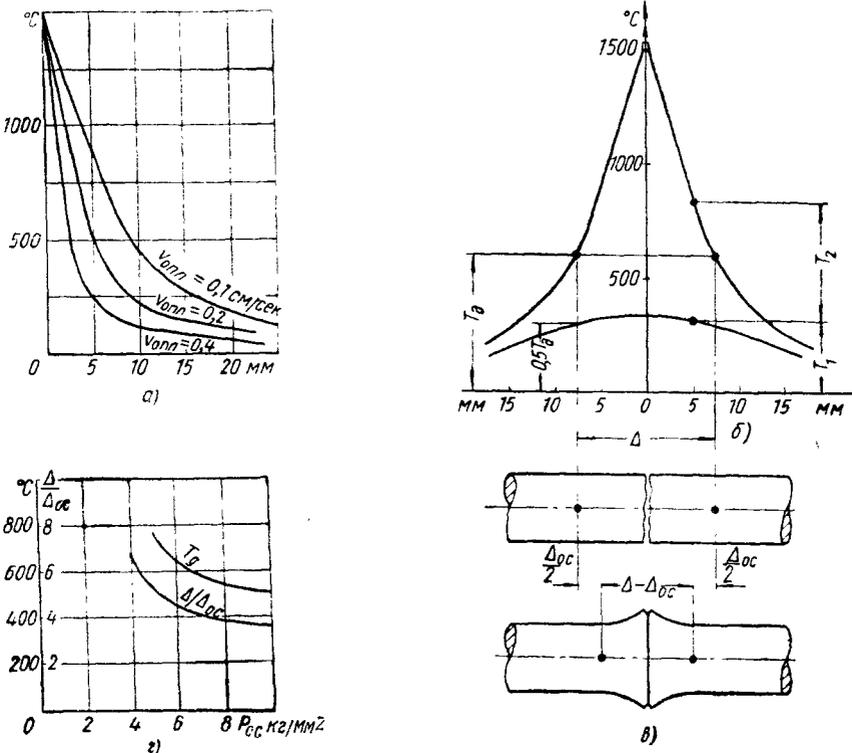
Полная длительность одной сварочной операции $t_1 = 8 + 5,8 = 13,8$ сек.

Часовая производительность $N = \frac{3600}{13,8} = 260$ шт.

Нагрев при сварке оплавлением должен быть рассмотрен в двух случаях: при сварке без предварительного подогрева (сварка непрерывным оплавлением) и при сварке с подогревом. Сварка непрерывным оплавлением характеризуется очень быстрым снижением температуры при удалении от плоскости стыка (см. кривую В на фиг. 21, б). Это объясняется тем, что при оплавлении наиболее нагретая часть металла вблизи торцов свариваемых деталей непрерывно выбрасывается из зазора между ними, унося с собой большое количество тепла. К плоскости стыка при этом все время приближаются относительно холодные участки деталей. Чем выше скорость оплавления (суммарное укорочение деталей в единицу времени), тем на относительно меньшее расстояние от плоскости стыка успевает распространиться тепло вдоль свариваемых деталей и тем быстрее снижается температура по мере удаления от стыка, тем больше градиент температуры. Влияние скорости оплавления на распределение температуры вдоль одной из свариваемых деталей (малоуглеродистая сталь) к концу оплавления показано на фиг. 27, а. Температура на торцах при этом близка к температуре плавления стали (около 1500°).

Нагрев при сварке непрерывным оплавлением так же, как при сварке сопротивлением, является результатом совместного действия тепла,

выделяемого внутри деталей, и тепла, генерируемого в контакте. Первое нагревает детали до температуры T_1 , а второе до температуры T_2 (фиг. 27, б). При этом, однако, T_2 значительно меньше T_1 . Для осуществления качественной сварки оплавлением недостаточно нагреть торцы свариваемых деталей до температуры плавления стали. Помимо



Фиг. 27. К тепловым расчетам сварки оплавлением:

а — распределение температуры вдоль свариваемых заготовок из малоуглеродистой стали при различной скорости оплавления; б — схема распределения температуры при сварке непрерывным оплавлением; в — детали до и после осадки; г — зависимость температуры начала пластической деформации T_0 и отношения $\frac{\Delta}{\Delta_{ос}}$ от удельного давления осадки при сварке оплавлением малоуглеродистой стали.

этого, необходимо, чтобы детали на длине Δ были нагреты до температуры T_0 , достаточной для их пластической деформации при заданном давлении осадки. При осадке участок длиной Δ укорачивается на величину осадки $\Delta_{ос}$ и становится равным $\Delta - \Delta_{ос}$ (на фиг. 27, в это поясняется эскизом деталей до и после осадки). При заданной величине осадки, зависящей в основном от сечения свариваемых деталей (см. табл. 8), длина участка Δ может быть определена, если будет известно отношение $\frac{\Delta}{\Delta_{ос}}$. На фиг. 27, г приведена опытная зависимость $\frac{\Delta}{\Delta_{ос}}$ от удельного давления осадки для малоуглеродистой стали. На этой же

диаграмме дана зависимость температуры T_{∂} от удельного давления p_{oc} . Как следует из этих кривых, с увеличением удельного давления осадки уменьшается как температура T_{∂} , так и отношение $\frac{\Delta}{\Delta_{oc}}$, а следовательно, и Δ при заданной величине осадки Δ_{oc} . При сварке непрерывным оплавлением трудно получить широкую зону интенсивного нагрева деталей, поэтому при малой длине Δ стремятся к уменьшению необходимой температуры T_{∂} , что достигается увеличением давления осадки. Таким образом, *сварка непрерывным оплавлением практически осуществима только при большом давлении осадки*. При сварке малоуглеродистой стали температура T_{∂} не должна превышать 500—600°.

При сварке с подогревом обычно используются относительно небольшие плотности тока, вследствие чего теплом, выделяемым непосредственно в свариваемых деталях при оплавлении, в этом случае можно пренебречь. В связи с этим подогрев должен быть достаточным для получения в деталях в момент его окончания температуры, близкой к T_{∂} (во всяком случае, $T_{под}$ должна быть не менее $0,8T_{\partial}$).

Исходя из этого условия, тепловой расчет при сварке оплавлением с подогревом производится в следующем порядке:

а) определяется температура T_{∂} и соответствующая ей температура $T'_{под} = (0,8 \div 1) T_{\partial}$;

б) при заданной длительности подогрева вычисляется ток, необходимый для достижения температуры $T_{под}$;

в) по найденному току определяется сопротивление контакта при оплавлении (скоростью оплавления при этом приходится задаваться ориентировочно) и вычисляется количество выделяемого в контакте тепла (в секунду);

г) определяется количество тепла, отводимого в секунду от контакта в глубь деталей, и вычисляется количество тепла, которое должно быть израсходовано в единицу времени на расплавление стали, т. е. на ее оплавление;

д) определяется скорость оплавления, обеспечивающая непрерывное протекание процесса.

Необходимый при подогреве ток может быть вычислен по преобразованному уравнению (17)

$$I_{под} = \sqrt{\frac{\gamma c F^2 T'_{под}}{0,24 k_3 p t}}. \quad (23)$$

Простое преобразование формулы (23) позволяет вычислить необходимую длительность подогрева при заданной силе тока. Сопротивление контакта при оплавлении определяется по формуле (8). Количество тепла, выделяемое в контакте (в кал/сек),

$$q_k = 0,24 k_3 I_{опл}^2 R_{опл}, \quad (24)$$

где коэффициент $k_3 \approx 0,7$ учитывает несинусоидальную форму кривой тока при оплавлении.

Количество тепла, отводимое в глубь деталей, может быть найдено по формуле

$$q_{отв} = 2lF \frac{\Delta T}{\Delta x}, \quad (25)$$

где $\frac{\Delta T}{\Delta x}$ — градиент температуры у стыка (ориентировочно он равен при сварке стали без подогрева 4000° на 1 см); при подогреве до температуры $T_{под}$ величину $\frac{\Delta T}{\Delta x}$ можно приближенно определять по формуле

$$\frac{\Delta T}{\Delta x} = 4000 \cdot \frac{1500 - T_{под}}{1500}.$$

Тепло, расходуемое на плавление стали,

$$q_{опл} = q_k - q_{отв}, \quad (26)$$

оно должно быть равно

$$q_{опл} = v_{опл} \gamma F [c (T_{опл} - T_{под}) + m_0], \quad (27)$$

где $v_{опл}$ — скорость оплавления в см/сек;

$T_{опл}$ — средняя температура вылетающих при оплавлении частиц металла (при сварке стали $T_{опл} \approx 2000^\circ$);

$T_{под}$ — температура подогрева;

m_0 — скрытая теплота плавления (для стали $m_0 = 65$ кал/г).

Подставляя в формулу (27) значение $q_{опл}$ из формулы (26), легко определить скорость оплавления, обеспечивающую устойчивый процесс.

Применение расчетных формул иллюстрируется приведенным ниже примером.

Пример тепловых расчетов сварки оплавлением

Необходимо произвести сварку оплавлением труб из малоуглеродистой стали наружным диаметром 150 мм при толщине стенки 20 мм с использованием стыковой машины, создающей при оплавлении ток $I_{опл} = 2500$ а. Площадь сечения трубы равна 8200 мм².

Начнем с проверки возможности сварки непрерывным оплавлением со скоростью 1 мм/сек (0,1 см/сек). Полагая в формуле (27) $T_{под} = 0^\circ$ С, получим расход тепла на оплавление

$$q_{опл} = 0,1 \cdot 7,85 \cdot 82 (0,15 \cdot 2000 + 65) = 23\,600 \text{ кал/сек.}$$

Потери на теплоотвод в детали равны

$$q_{отв} = 2 \cdot 0,1 \cdot 82 \cdot 4000 = 65\,200 \text{ кал/сек.}$$

Общее количество тепла, которое должно выделяться в контакте при оплавлении [по формуле (26)], составит

$$q_k = 65\,200 + 23\,600 = 88\,800 \text{ кал/сек.}$$

По формуле (8) контактное сопротивление при оплавлении для $j = 3$ а/мм² и $v_{опл} = 0,1$ см/сек

$$R_{опл} = \frac{9500}{\frac{2}{82^{\frac{1}{3}}} \cdot \frac{1}{0,1^{\frac{1}{3}}} \cdot 3} = 360 \text{ мком} = 360 \cdot 10^{-6} \text{ ом.}$$

Количество выделяемого в секунду тепла при оплавлении

$$q_k = 0,24 \cdot 0,7 \cdot 360 \cdot 10^{-6} \cdot 25 \cdot 000^2 = 38 \cdot 000 \text{ кал/сек.}$$

Сопоставление фактически выделяемого и необходимого для сварки количества тепла указывает на невозможность проведения сварки непрерывным оплавлением. В данном случае требуется предварительный подогрев. Определим скорость оплавления, возможную после подогрева до $T_{под} = 1000^\circ \text{C}$; в этом случае

$$q_{отв} = 2 \cdot 0,1 \cdot 82 \cdot 4000 \frac{1500 - 1000}{1500} = 22 \cdot 000 \text{ кал/сек.}$$

Непосредственно на оплавление сможет быть израсходовано

$$q_{опл} = 38 \cdot 000 - 22 \cdot 000 = 16 \cdot 000 \text{ кал/сек.}$$

По формуле (27) найдем

$$v_{опл} = \frac{16000}{7,85 \cdot 82 \cdot 0,15 (2000 - 1000) + 65} = 0,115 \text{ см/сек.}$$

Ток при подогреве выше, чем при оплавлении, и равен $55 \cdot 000 \text{ а}$. Легко определить необходимую длительность подогрева (длительность включения тока при подогреве), решив уравнение (17) относительно t . Это уравнение будет иметь вид

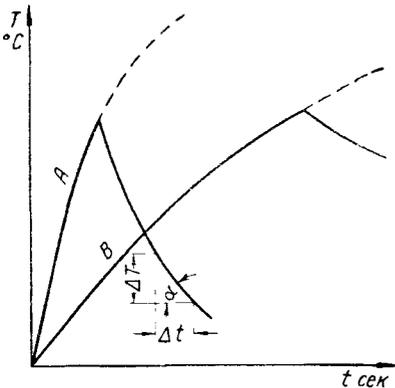
$$t = \frac{1000 \cdot 7,85 \cdot 0,15 \cdot 82^2}{0,24 \cdot 48 \cdot 10^{-6} \cdot 55 \cdot 000^2 \cdot 0,75} = 265 \text{ сек.}$$

Полная длительность подогрева, включая паузы между отдельными импульсами включения тока, составит:

$$t_1 = 1,3t = 1,3 \cdot 265 = 344 \text{ сек.}$$

Следует иметь в виду при пользовании этими расчетами, что они основаны на большом числе не совсем точных допущений, в связи с чем результаты этих расчетов должны уточняться опытным путем при налаживании технологического процесса сварки. Формула (27) показывает, в частности, что *необходимая для оплавления мощность растет с увеличением скорости оплавления и с понижением температуры подогрева*. Скорости оплавления при сварке стали обычно лежат в пределах $1-3 \text{ мм/сек}$.

При сварке сталей, склонных к закалке, иногда приходится ограничивать скорость охлаждения после сварки с тем, чтобы избежать недопустимой хрупкости соединения. Обычно чем выше скорость нагрева, тем больше скорость последующего охлаждения. Это иллюстрируется кривыми изменения температуры при быстром



Фиг. 28. Типовые кривые изменения температуры при нагреве и охлаждении:

A — быстрый нагрев; B — медленный нагрев.

(фиг. 28, кривая A) и медленном (фиг. 28, кривая B) нагреве. Скорость охлаждения, равная $\frac{\Delta T}{\Delta t} = \text{tg } \alpha$, в первом случае значительно

выше, чем во втором. Предварительный подогрев уменьшающий скорость нарастания температуры, приводит к уменьшению скорости охлаждения.

Таким образом, подогрев при сварке оплавлением способствует уменьшению необходимой мощности, ведет к более равномерному распределению температуры в деталях и уменьшает скорость охлаждения после сварки.

§ 8. НАГРЕВ ПРИ СВАРКЕ ПО МЕТОДУ ИГНАТЬЕВА

Как отмечалось в гл. 1, при сварке по методу Игнатъева электрический ток протекает параллельно плоскости соединения свариваемых деталей почти равномерно. В начале прессовой сварки конечные участки деталей (см. фиг. 8, а), примыкающие к электродам, нагреваются быстрее их средней части. По мере улучшения контактов электрод — деталь в процессе нагрева интенсивность выделения тепла в этих контактах уменьшается, и начинает заметно сказываться теплоотвод: температура среднего участка деталей становится выше температуры его концов. Изменяя усилие нажатия электродов, можно изменять условия тепловыделения и теплоотвода в контактах и повышать степень равномерности нагрева деталей.

Общее количество тепла, необходимое для нагрева деталей при прессовой сварке по методу Игнатъева, определяется по формуле

$$Q = k_4 c T_{св} G, \quad (28)$$

где $T_{св}$ — требуемая температура нагрева в $^{\circ}\text{C}$;

c — средняя теплоемкость свариваемых сталей в интервале температур от комнатной до $T_{св}$;

G — вес свариваемых деталей;

k_4 — коэффициент, учитывающий потери тепла ($k_4 = 3 \div 4$).

При сварке по методу Игнатъева сталь обычно нагревается до $1250\text{—}1300^{\circ}\text{C}$. Равномерный нагрев при прессовой сварке обеспечивается медленным повышением температуры со скоростью около $7^{\circ}\text{C}/\text{сек.}$, что соответствует общей длительности нагрева до 3 мин. При этом полезная мощность, необходимая для нагрева заготовок весом 1 кг, по данным А. М. Лушниковой, лежит в пределах $12\text{—}25 \text{ квт}/\text{кг}$, а удельная мощность сварочной машины (мощность, отнесенная к 1 кг веса заготовок) достигает $50 \text{ квт}/\text{кг}$.

При непрерывной сварке по методу Игнатъева (см. фиг. 8, б) вес металла (в граммах), нагреваемого в секунду, равен

$$G_1 = v F \gamma, \quad (29)$$

где v — скорость перемещения заготовок (скорость сварки) в $\text{см}/\text{сек}$;

F — суммарная площадь поперечного сечения заготовок в см^2 ;

γ — удельный вес стали.

Секундный расход тепла (в $\text{кал}/\text{сек}$) определится по формуле

$$q = k_4 G_1 c T_{св}, \quad (30)$$

где $T_{св}$ — требуемая температура нагрева в $^{\circ}\text{C}$;

c — средняя теплоемкость;

k_4 — коэффициент, учитывающий потери тепла.

При непрерывной сварке (см. фиг. 8, б) равномерный нагрев достигается легче, чем при прессовой сварке. В связи с этим при непрерывной сварке допускается большая скорость нагрева, резко уменьшающая потери тепла (коэффициент k_4 лежит в пределах 1,5—2,0).

Пример расчета нагрева при сварке по методу Игнатъева

Определить количество тепла и расход электроэнергии для прессовой сварки по методу Игнатъева пластинки сечением 5×20 мм, длиной 100 мм с бруском той же длины, сечением 20×20 мм. Материал деталей — сталь. Суммарный вес свариваемых деталей

$$G_1 = \frac{(5 + 20) 20 \cdot 100 \cdot 7,85}{1000} \approx 390 \text{ г.}$$

По формуле (28) при $k_4 = 3,5$

$$Q = k_4 c T_{св} G = 3,5 \cdot 0,15 \cdot 1300 \cdot 390 = 266\,000 \text{ кал}$$

или $266\,000/0,24 = 1\,110\,000$ ватт·сек. При нагреве в течение 3 мин. мощность, потребляемая непосредственно в зоне сварки, составит

$$A = \frac{1\,110\,000}{3 \cdot 60 \cdot 1000} = 6,2 \text{ квт.}$$

§ 9. НАГРЕВ ПРИ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКЕ

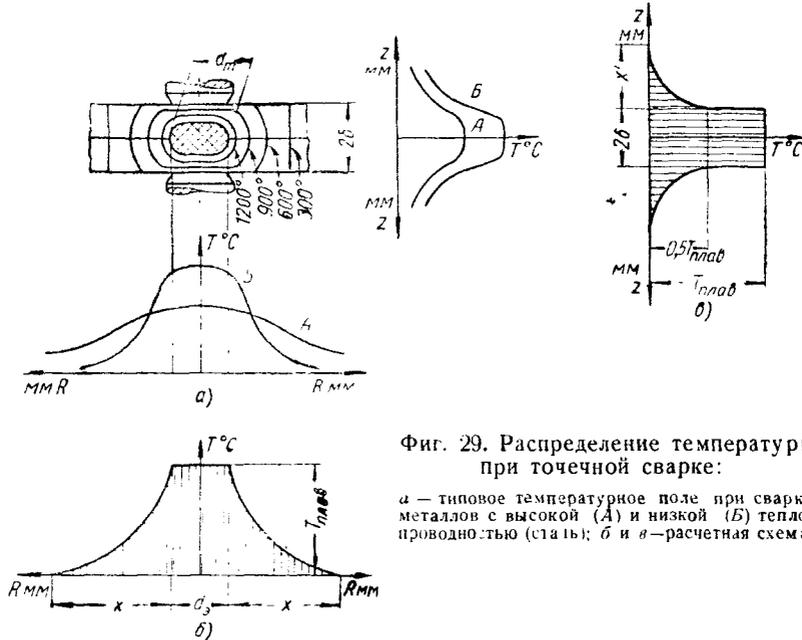
Наглядное представление о нагреве при точечной сварке дает изучение температурного поля в свариваемых деталях. Такое поле может быть изображено в виде системы изотерм (линий равной температуры), построенных в плоскости, проходящей через ось свариваемой точки (ось электродов). Температурное поле во время сварки непрерывно изменяется. К концу точечной сварки стальных деталей оно имеет вид, схематически показанный на фиг. 29, а, на которой нанесены изотермы через каждые 300°C . Температура в средней, заштрихованной, части (ядро точки) выше температуры плавления свариваемого металла. Металл расплавленного ядра, кристаллизуясь при охлаждении, образует сварное соединение, поэтому диаметр ядра d_m определяет размер (площадь рабочего сечения) сварной точки. Температура в ядре может довольно существенно превышать температуру плавления свариваемого металла (при сварке стали на $200\text{—}300^\circ \text{C}$). Дальнейший рост температуры в ядре затрудняется очень интенсивным перемешиванием расплавленного металла под действием электромагнитных сил, возникающих при протекании значительного тока через свариваемую точку.

Вследствие интенсивного отвода тепла в электроды, как правило, обладающие высокой тепло- и электропроводностью, температура очень быстро понижается от границы ядра к наружной поверхности деталей, где она обычно не превосходит (0,4—0,6) $T_{\text{плав}}$.

В радиальном направлении температура также относительно быстро снижается по мере удаления от границы расплавленного ядра точки. Чем выше температуропроводность свариваемого металла, тем медленнее это снижение и тем меньше температурный градиент. На фиг. 29, а показаны схемы распределения температуры в осевом (Z)

и радиальном (R) направлениях при сварке металлов с высокой (A) температуропроводностью (например, алюминий) и низкой (B) температуропроводностью (например, сталь).

Изучение тепловых процессов при точечной сварке обычно ставит своей задачей определение необходимого количества тепла в калориях



Фиг. 29. Распределение температуры при точечной сварке:

a — типовое температурное поле при сварке металлов с высокой (A) и низкой (B) теплопроводностью (сталь); b и $в$ — расчетная схема.

(или количества электроэнергии в *ватт-секундах*) для сварки отдельной точки. Для этой цели составляется уравнение баланса тепла, которое в общем виде напишется так:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4, \quad (31)$$

где Q — общее количество тепла, выделяемого между электродами (в свариваемых деталях и переходных контактах) во время сварки одной точки;

- Q_1 — тепло, расходуемое на нагрев условно выделяемого центрального столбика металла диаметром d_3 , зажатого между электродами;
- Q_2 — тепло, расходуемое на нагрев металла деталей, окружающего центральный столбик;
- Q_3 — тепло, идущее на нагрев электродов через их контактные поверхности;
- Q_4 — потери тепла лучеиспусканием с поверхности свариваемых деталей.

Тепло Q_1 определяется размерами центрального столбика (диаметром рабочей поверхности электродов d_3 и толщиной свариваемого материала δ) и теплофизическими свойствами металла. Оно почти не зависит от

длительности нагрева. Учитывая тепло, необходимое для расплавления металла в ядре (скрытую теплоту плавления), средняя расчетная температура центрального столбика к концу сварочного нагрева может приниматься равной температуре плавления $T_{плав}$. Тогда при сварке двух деталей

$$Q_1 = \frac{\pi d_3^2}{4} 2\delta c \gamma T_{плав}, \quad (32)$$

где c — средняя теплоемкость при нагреве до температуры плавления; γ — удельный вес.

В окружающем центральный столбик кольце основного металла температура постепенно снижается от $T_{плав}$ до комнатной T_0 , которая в расчетах условно принимается равной нулю. Уже на небольшом расстоянии от границы ядра температура почти не изменяется по толщине деталей. Средняя температура кольца равна $0,25T_{плав}$. При заданной толщине свариваемых деталей и определенных теплофизических свойствах металла количество тепла Q_2 , необходимое для нагрева кольца до температуры $0,25T_{плав}$, зависит только от наружного диаметра кольца $D = d_3 + 2x$. Внешняя граница кольца (размер x) определяется точкой, в которой к концу сварочного нагрева имеется заметное повышение температуры.

Наружный диаметр кольца, очевидно, тем больше, чем длительнее нагрев и чем выше коэффициент температуропроводности a свариваемого металла. В расчетах величина x может определяться по формуле

$$x = 4 \sqrt{at}, \quad (33)$$

где a — коэффициент температуропроводности в $см^2/сек$;

t — длительность сварочного нагрева в секундах.

При сварке малоуглеродистой стали средняя температура кольца, окружающего центральный столбик, равна $0,25T_{плав} = 375^\circ C$. При этой температуре $a = 0,09 см^2/сек$ и $x = 4\sqrt{0,09t} = 1,2\sqrt{t}$. Для меди $x' = 3,6\sqrt{t}$ и для дуралюмина $x = 3,1\sqrt{t}$. Тепло Q_2 может быть рассчитано по формуле

$$Q_2 = k_1 \pi x (d_3 + x) 2\delta c \gamma \frac{T_{плав}}{4}, \quad (34)$$

где $\pi x (d_3 + x) 2\delta$ — объем кольца;

$\frac{T_{плав}}{4}$ — средняя температура кольца;

k_1 — коэффициент, учитывающий неравномерность нагрева кольца и принимаемый равным 0,8.

Коэффициент k_1 вводится потому, что объем металла кольца, нагреваемого до высоких температур, сравнительно мал и наиболее нагретые его участки располагаются близко к внутренней поверхности.

В тех случаях, когда диаметр контактной поверхности электродов трудно заранее точно определить (например, при электродах со сферической контактной поверхностью), вместо диаметра d_3 в расчетные формулы можно подставлять заданное значение диаметра ядра точки d_m .

Расход тепла Q_3 на нагрев электродов можно подсчитать, принимая температуру на их контактной поверхности $T_s = 0,5T_{n.las}$. При этом средняя температура интенсивно нагреваемого участка электродов длиной x' составит $T'_1 = 0,25T$. Объем нагреваемой части электрода равен

$$V = k_2 \cdot \frac{\pi d_s^2}{4} x', \quad (35)$$

где d_s — диаметр контактной поверхности электрода (может заменяться диаметром ядра точки d_m);

x' — расстояние от контактной поверхности до условной границы распространения тепла в электроде;

k_2 — коэффициент, учитывающий форму электродов; при цилиндрическом электроде диаметром d_s коэффициент $k_2 = 1$; при коническом электроде можно принимать $k_2 = 1,5$; при электроде со сферической контактной поверхностью $k_2 = 2$.

Тепло Q_3 , идущее на нагрев двух электродов, определяется по формуле

$$Q_3 = 2k_2 \frac{\pi d_s^2}{4} x' c' \gamma' \frac{T_{n.las}}{8}, \quad (36)$$

где c' и γ' — теплоемкость и удельный вес металла электродов.

При кратковременных процессах точечной сварки потерями тепла на лучеиспускание можно пренебречь. В этом случае уравнение баланса тепла примет следующий вид (сварка двух деталей):

$$Q = \frac{\pi d_s^2}{4} \cdot 2\delta c' T_{n.las} + k_1 \pi x (d_s + x) 2\delta c' \frac{T_{n.las}}{4} + \\ + 2k_2 \frac{\pi d_s^2}{4} x' c' \gamma' \frac{T_{n.las}}{8}. \quad (37)$$

Соответствующее условное распределение температуры в деталях и электродах показано на фиг. 29, б и в.

Общее количество тепла Q , найденное по формуле (37), зависит от длительности нагрева t , хотя величина t в явном виде в эту формулу не входит — с увеличением длительности нагрева растут значения x и x' .

Задаваясь технологически целесообразной длительностью сварки, можно, пользуясь формулой (37), рассчитать необходимую для осуществления сварки силу тока. Для этого предварительно устанавливается по технологическим соображениям желательное усилие сжатия деталей и по этому усилию рассчитываются начальное и конечное сопротивления участка сварочной цепи между электродами. Так как начальное сопротивление холодных деталей, как было показано выше, очень быстро понижается, то в тепловых расчетах точечной сварки целесообразно вводить сопротивление горячих деталей (конечное сопротивление), умноженное на некоторый коэффициент, зависящий от свойств свариваемого материала.

Преобразуя формулу (1), можно написать

$$I_2 = \sqrt{\frac{Q}{0,24m_2R_{\text{сop}}t}}, \quad (38)$$

где I_2 — ток в сварочной цепи;

$R_{\text{сop}}$ — общее сопротивление деталей к концу сварочного нагрева;

t — длительность сварки;

m_2 — коэффициент, учитывающий изменение сопротивления в процессе сварки; для стальных деталей $m_2 \approx 1,0 \div 1,1$; для алюминиевых сплавов $m_2 \approx 1,2 \div 1,4$.

Применение приведенных расчетных формул поясняется примерами. При пользовании этими формулами следует помнить, что тепло Q и связанная с ним величина $q = \frac{Q}{t}$ характеризуют только расход электроэнергии и мощность, потребляемые на участке сварочной цепи между электродами, но совершенно не определяют общего расхода энергии во время сварки и общей мощности сварочной машины, так как при точечной сварке, как правило, очень большая часть электроэнергии затрачивается в элементах самой машины.

Примеры тепловых расчетов точечной сварки

1. Требуется определить общий расход тепла и силу тока при точечной сварке листов из малоуглеродистой стали толщиной 4,0 мм каждый при рабочем диаметре конических электродов $d_2 = 12$ мм, усилии на электродах $P = 800$ кг и длительности включения сварочного тока $t = 1,0$ сек. Средняя теплоемкость для стали $c = 0,16$ кал/г°С, для меди 0,09 кал/г°С.

По формуле (33) для стали $x = 1,2 \sqrt{t} = 1,2 \sqrt{1} = 1,2$ см. Для медных электродов $x' = 3,6 \sqrt{t} = 3,6 \sqrt{1} = 3,6$ см.

Общее количество тепла определяют по формуле (37), принимая $k_1 = 0,8$; $k_2 = 1,5$,

$$\begin{aligned} Q &= \frac{3,14 \cdot 1,2}{4} \cdot 2 \cdot 0,4 \cdot 0,16 \cdot 7,85 \cdot 1500 + 0,8 \cdot 3,14 \cdot 1,2 (1,2 + 1,2) \cdot 2 \cdot 0,4 \times \\ &\times 0,16 \cdot 7,85 \cdot \frac{1500}{4} + 2 \cdot 1,5 \cdot \frac{3,14 \cdot 1,2^2}{4} \cdot \frac{3,6 \cdot 0,09 \cdot 8,9 \cdot 1500}{8} = \\ &= 1700 + 2270 + 1830 = 5800 \text{ кал.} \end{aligned}$$

В соответствующем примере расчета было вычислено конечное сопротивление нагретых деталей толщиной 4 мм при $P = 800$ кг. Оно равно 58 мком. Принимаем $m_2 = 1,2$ (сопротивление в процессе точечной сварки может быть выше и начальное и конечное значений).

Необходимый сварочный ток определяется по формуле (38)

$$I_2 = \sqrt{\frac{Q}{0,24m_2R_{\text{сop}}t}} = \sqrt{\frac{5800}{0,24 \cdot 1,2 \cdot 58 \cdot 10^{-6} \cdot 1}} = 18600 \text{ а} \approx 19000 \text{ а.}$$

Из приведенных цифр следует, что около 30% общего количества тепла, расходуемого на сварку одной точки, идет на нагрев электродов.

2. Рассчитать общее количество тепла, необходимое для точечной сварки листов из дуралюмина Д16Т толщиной 1 мм. Electroды имеют сферическую контактную поверхность. Усилие на электродах $P = 240$ кг. Расчетный диаметр точки $d_m = 5$ мм. Длительность включения сварочного тока $t = 0,18$ сек.

Для дуралюмина $x = 3,1 \sqrt{t} = 3,1 \sqrt{0,18} = 1,31$ см. Для медных электродов $x' = 3,6 \sqrt{t} = 3,6 \sqrt{0,18} = 1,52$ см.

Теплоемкость дуралюмина равна $0,20 \text{ кал/г}^\circ\text{С}$; удельный вес $2,8 \text{ г/см}^3$. Для дуралюмина коэффициент k_1 принимаем равным $0,8$. Коэффициент k_2 для сферических электродов равен 2 .

Общее количество тепла по формуле (35) равно

$$Q = \frac{3,14 \cdot 0,5^2}{4} \cdot 2 \cdot 0,1 \cdot 0,2 \cdot 2,8 \cdot 648 + 0,8 \cdot 3,14 \cdot 1,31 (1,31 + 0,5) \cdot 2 \cdot 0,1 \cdot 0,2 \cdot 2,8 \frac{648}{4} + \\ + 2 \cdot 2 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,5^2}{4} \cdot 1,52 \cdot 0,09 \cdot 8,8 \frac{648}{8} = 14 + 101 + 77 = 192 \text{ кал.}$$

Для вычисления требуемой силы тока необходимо предварительно определить эффективное сопротивление. При диаметре точки $d_m = 5 \text{ мм}$ и толщине листа 1 мм отношение $\frac{d_m}{\delta} = 5$. Для этого значения $\frac{d_m}{\delta}$ по фиг. 23, а находим $A_0 = 0,06$. Удельное сопротивление дуралюмина при комнатной температуре $\rho_0 = 3,4 \text{ мком} \cdot \text{см}$. Температурный коэффициент удельного сопротивления для дуралюмина равен $0,0022$. Удельное сопротивление при 648°С

$$\rho_t = \rho_0 (1 + \alpha T) = 3,4 (1 + 0,0022 \cdot 648) = 8,3 \text{ мком} \cdot \text{см.}$$

По формуле (11) при $k = 0,9$ имеем для двух деталей

$$R_{\text{гор}} = 2 \cdot 0,06 \frac{8,3}{0,1} = 10 \text{ мком.}$$

Необходимый ток по формуле (38) (при $m_2 = 1,4$)

$$I_2 = \sqrt{\frac{192}{0,24 \cdot 0,18 \cdot 1,4 \cdot 10 \cdot 10^{-6}}} = 18000 \text{ а.}$$

Потери тепла в электроды при сварке дуралюмина выше, чем при сварке стали, и в рассматриваемом примере достигают 45% .

Из сопоставления результатов расчета точечной сварки малоуглеродистой стали и дуралюмина следует, что практически при одном и том же токе толщина стальных деталей и размеры получаемой точки в несколько раз больше, чем при сварке деталей из дуралюмина. При этом расход тепла на сварку деталей из алюминиевого сплава, даже с поправкой на неодинаковую длительность процесса, во много раз меньше расхода при сварке стальных деталей. Отсюда следует, что относительно высокая мощность, необходимая для сварки легких сплавов, связана не с теплофизическими свойствами этих сплавов (высокой теплопроводностью), а в основном с низким их электрическим сопротивлением.

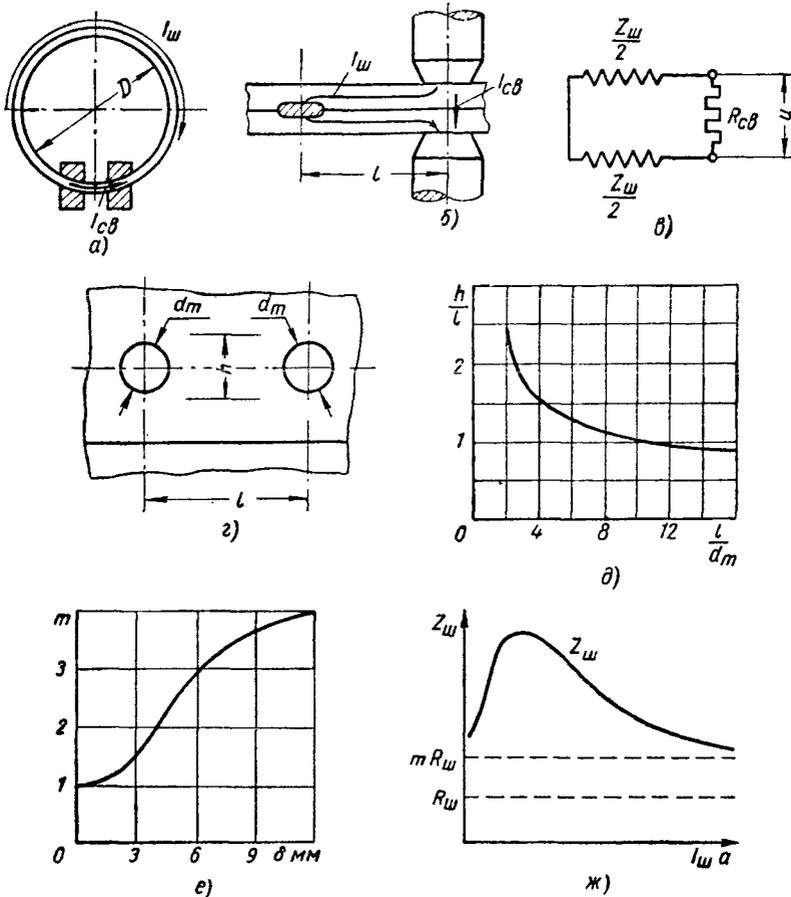
§ 10. ШУНТИРОВАНИЕ СВАРОЧНОГО ТОКА

Выше были показаны способы расчета необходимого для сварки тока. Ток во вторичной цепи сварочной машины во многих случаях должен быть больше расчетного, так как часть вторичного тока иногда протекает в свариваемых деталях, минуя зону непосредственной сварки. Это явление носит название шунтирования тока.

При стыковой сварке шунтирование наблюдается в изделиях с замкнутым контуром (фиг. 30, а). При точечной сварке часть тока шунтируется через ранее сваренные точки (фиг. 30, б) или через случайные контакты между деталями. При роликовой сварке ток шунтируется через ранее сваренный участок шва.

Во всех случаях суммарная сила тока во вторичной цепи машины

$$I_2 \approx I_{\text{св}} + I_{\text{ш}}. \quad (39)$$



Фиг. 30. Шунтирование тока при стыковой и точечной сварке:

a — шунтирование при стыковой сварке кольца; *б* — шунтирование при двухсторонней точечной сварке; *в* — эквивалентная схема при шунтировании; *г* — условная ширина проводника при расчете сопротивления шунта; *д* — график для определения условной ширины проводника при шунтировании (К. А. Кочергин); *е* — зависимость коэффициента поверхностного эффекта сопротивления шунта от толщины детали при точечной сварке листов из малоуглеродистой стали и нормальном шаге точек; *ж* — типовая зависимость сопротивления шунта от тока в нем.

По закону Ома для разветвленной цепи, эквивалентная схема которой приведена на фиг. 30, *в*, напряжение

$$U = I_{св} R_{св} = I_{ш} Z_{ш} \quad (40)$$

или

$$I_{ш} = I_{св} \frac{R_{св}}{Z_{ш}}, \quad (41)$$

где $I_{св}$ — ток, протекающий в зоне сварки;
 $I_{ш}$ — ток, протекающий через шунт;

$R_{св}$ — активное сопротивление свариваемых деталей (их реактивным сопротивлением, как правило, можно пренебречь);

$Z_{ш}$ — полное сопротивление шунта.

Таким образом, сварочный ток и ток шунтирования обратно пропорциональны соответствующим сопротивлениям. В общем случае сопротивление шунта определяется зависимостью

$$Z_{ш} = \sqrt{(mR_{ш})^2 + X_{ш}^2}, \quad (42)$$

где $R_{ш}$ — омическое сопротивление шунтирующей цепи;

m — коэффициент поверхностного эффекта;

$X_{ш}$ — индуктивное сопротивление шунта.

При стыковой сварке колец из малоуглеродистой или другой магнитной стали, согнутых из круглого стержня диаметром менее 20 мм или толщиной до 10 мм, влиянием поверхностного эффекта можно пренебрегать ($m \approx 1,0$). При диаметре 40 мм и, соответственно, толщине 20 мм приблизительно $m = 1,5$, при диаметре 60 мм m достигает 2,5. Омическое сопротивление кольца

$$R_{ш} = \rho_0 \frac{\pi D}{F}, \quad (43)$$

где D — диаметр кольца;

F — площадь его поперечного сечения;

ρ_0 — удельное сопротивление стали.

Индуктивное сопротивление кольца зависит от его геометрических размеров и от плотности тока в нем. В первом приближении для колец диаметром от 100 до 500 мм индуктивное сопротивление можно принимать равным 300—1500 мкОм (при нормальной частоте переменного тока, равной 50 Гц). Это сопротивление пропорционально диаметру кольца и увеличивается с уменьшением плотности тока.

При точечной сварке омическое сопротивление шунта можно вычислить по формуле (фиг. 30, з)

$$R_{ш} = 2\rho_0 \frac{l}{h\delta}, \quad (44)$$

где δ — толщина свариваемых деталей;

l — расстояние между центрами смежных точек (шаг точек);

ρ_0 — удельное сопротивление;

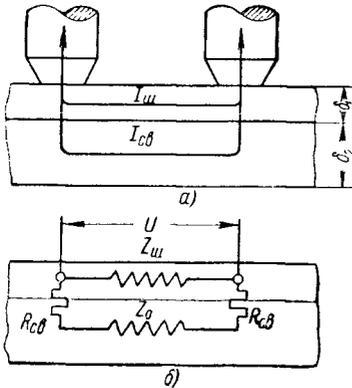
h — эквивалентная ширина проводника.

График на фиг. 30, д, построенный К. А. Кочергиным, позволяет определить отношение $\frac{h}{l}$ в зависимости от отношения $\frac{l}{d_m}$, где d_m — диаметр ядра точки. Коэффициент поверхностного эффекта при точечной сварке стальных деталей относительно большой толщины велик, а при сварке тонких деталей (толщиной менее 2 мм) им можно пренебрегать. Зависимость m от δ в условиях точечной сварки приведена на фиг. 30, е. Индуктивное сопротивление очень резко изменяется с изменением плотности тока в шунте. Вначале с увеличением тока (фиг. 30, ж) оно растет, а затем медленно падает. Плотность тока в шунте обычно настолько

велика, что индуктивной составляющей сопротивления шунта при точечной сварке можно пренебречь. Тогда сопротивление шунта

$$Z_{ш} = mR_{ш}. \quad (45)$$

Шунтирование тока имеет очень важное значение при односторонней точечной сварке (фиг. 31, а). В этом случае сопротивление основной сварочной цепи (фиг. 31, б) складывается из сопротивления контактов и из сопротивления нижнего листа, которое может быть найдено по формуле (44) с введением коэффициента m по фиг. 30, е. Сопротивление шунта, т. е. верхнего листа, непосредственно определяется по формуле (44) с введением соответствующего коэффициента m .



Фиг. 31. Схема распределения токов (а) и эквивалентная схема электрических цепей (б) при односторонней двухточечной сварке.

Расчеты по шунтированию поясняются приведенными ниже примерами.

Примеры расчета сопротивления и тока шунта

1. Определить сопротивление и ток шунта при стыковой сварке оплавлением кольца, загнутого из круглого прутка малоуглеродистой стали сечением 700 мм² и диаметром 300 мм. Напряжение на электродах при сварке равно 2,5 в.

Сопротивление свариваемых деталей, пренебрегая собственным сопротивлением выступающих из электродов участков кольца, определяются по формуле (8) для $v_{опл} = 0,2$ см/сек и $j = 10$ а/мм²

$$R_{опл} = \frac{9500}{2 \cdot \frac{1}{20^3 \cdot 0,2^3 \cdot 10}} = 220 \text{ мком} = 220 \cdot 10^{-6} \text{ ом.}$$

Омическое сопротивление шунта по формуле (43) равно

$$R_{ш} = \rho_0 \frac{\pi D}{F} = 13,5 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{3,14 \cdot 30}{7} = 180 \cdot 10^{-6} \text{ ом.}$$

Активное сопротивление шунта с учетом коэффициента поверхностного эффекта, равного 1,2 при диаметре 30 мм, составит

$$mR_{ш} = 1,2 \cdot 180 \cdot 10^{-6} = 216 \cdot 10^{-6} \text{ ом} = 216 \text{ мком.}$$

Индуктивное сопротивление кольца диаметром 300 мм приблизительно равно 600 мком. Полное сопротивление шунта

$$Z_{ш} = \sqrt{(mR_{ш})^2 + X_{ш}^2} = \sqrt{216^2 + 600^2} = 638 \text{ мком.}$$

При найденных значениях сопротивлений сварочный ток

$$I_{сб} = \frac{2,5}{220 \cdot 10^{-6}} = 11 \text{ 300 а,}$$

и ток в шунте

$$I_{ш} = \frac{2,5}{0,35 \cdot 10^{-6}} = 3900 \text{ а.}$$

Следует иметь в виду, что коэффициент поверхностного эффекта и в особенности индуктивное сопротивление кольца сильно зависят от силы тока в кольце, поэтому полученное расчетное значение тока $I_{ш}$ можно рассматривать только как приближенное.

Суммарный ток, протекающий во вторичной цепи сварочной машины, равен геометрической сумме токов $I_{св}$ и $I_{ш}$. В рассматриваемом примере ток $I_{св}$ — чисто активный, а ток $I_{ш}$ — почти чисто реактивный, поэтому они смещены по фазе на 90° , и общий ток

$$I_2 = \sqrt{I_{св}^2 + I_{ш}^2} = \sqrt{11300^2 + 3900^2} = 11900 \text{ а.}$$

2. Определить сопротивление и ток шунта при точечной сварке двух деталей из малоуглеродистой стали толщиной 4 мм каждая; шаг точек 75 мм; усилие, приложенное к электродам, 800 кг; диаметр контактной поверхности электродов 12,5 мм; диаметр точки также 12,5 мм.

$$\begin{aligned} \text{Для } \frac{l}{d_m} = \frac{75}{12,5} = 6 \text{ по графику на фиг. 30, } \frac{h}{l} = 1,28, \text{ откуда } h = 1,28 \cdot 75 = \\ = 96 \text{ мм} = 9,6 \text{ см.} \end{aligned}$$

По формуле (44) омическое сопротивление шунта

$$R_{ш} = 2\rho_0 \frac{l}{\pi h^2} = 2 \cdot 13,5 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{7,5}{9,6 \cdot 0,4} = 53 \cdot 10^{-6} \text{ ом.}$$

Для деталей толщиной 4 мм по фиг. 30, e коэффициент поверхностного эффекта $m = 2,2$. Активное сопротивление шунта $2,2 \cdot 53 \cdot 10^{-6} = 116 \cdot 10^{-6} \text{ ом} = 116 \text{ мком}$. Индуктивной составляющей сопротивления шунта пренебрегаем.

Сопротивление свариваемых деталей равно 58 мком (см. пример расчета сопротивления при точечной сварке).

По формуле (41) ток шунта

$$I_{ш} = I_{св} \frac{R_{св}}{Z_{ш}} = \frac{58}{116} I_{св} = 0,5 I_{св}.$$

Практически ток шунта меньше полученного расчетного значения вследствие повышения удельного сопротивления металла в шунте при его нагреве и из-за наличия индуктивной составляющей сопротивления шунта. Однако из приведенного примера видно, что шунтирование при точечной сварке существенно влияет на сварочный процесс.

ГЛАВА III

ПОВЕДЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ПРИ КОНТАКТНОЙ СВАРКЕ

§ 1. СВАРИВАЕМОСТЬ ПРИ КОНТАКТНОЙ СВАРКЕ

Контактная сварка осуществляется давлением при местном нагреве соединяемых деталей до температуры, лежащей ниже или выше точки плавления свариваемого металла. Первое имеет место при стыковой

a |



a |

Фиг. 32. Общие кристаллы в плоскости стыка (*a* — *a*) при сварке без расплавления малоуглеродистой стали. В стыке видны отдельные неметаллические включения ($\times 500$).

сварке сопротивлением (в очень редких случаях при точечной сварке), второе, как правило, при точечной и роликовой сварке, а также при стыковой сварке оплавлением.

Получение при контактной сварке вполне качественного соединения обычно сопровождается образованием на границе соединяемых деталей общих зерен металла (фиг. 32) — взаимной кристаллизацией (А. А. Алов). Образование таких зерен без расплавления металла возможно при одновременном соблюдении трех условий: а) свариваемые поверхности должны плотно прилегать друг к другу (должно быть приложено достаточное давление); б) на свариваемых поверхностях не должно быть пленок окислов, грязи и других посторонних веществ, препятствующих непосредственному взаимодействию атомов свариваемых деталей (поверхности свариваемых деталей должны предварительно очищаться); в) во время сварки должна быть обеспечена возможность образования новых кристаллов. Кроме того, в случае сварки деталей из неодинаковых металлов эти металлы (или сплавы) должны допускать по своей физической природе образование общих кристаллов.

Образование новых кристаллов возможно путем рекристаллизации, т. е. изменения размеров и формы существующих кристаллитов без изменения их кристаллической решетки, или путем перекристаллизации, т. е. процесса, при котором изменение размеров и формы кристаллитов сопровождается изменением их кристаллической решетки (например, в стали превращение феррита в аустенит).

При относительно невысоких температурах рекристаллизация, как известно из металловедения, возможна только в металле, подвергнутом предварительно пластической деформации. Чем выше температура нагрева, тем меньше должна быть степень предварительного наклепа для протекания рекристаллизации. Для каждого металла и сплава существует минимальная температура рекристаллизации, при нагреве ниже которой рекристаллизация невозможна, как бы сильно ни был предварительно наклепан металл. При достаточно высокой температуре начинается собирательная рекристаллизация (рост зерна), протекающая и без предварительной пластической деформации.

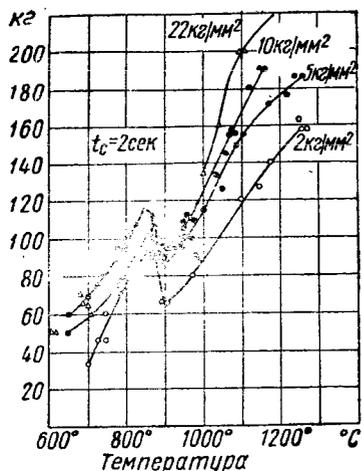
Минимальная температура рекристаллизации стали близка к 450° . При этой температуре рекристаллизация стали требует значительного наклепа и протекает крайне медленно. Минимальная температура, при которой иногда наблюдается местная сварка мягкой стали (при прокатке пачки листов), приближается к 600° . Однако минимальная температура рекристаллизации некоторых металлов, например алюминия, незначительно превышает комнатную. Поэтому, если хорошо очищенные детали из чистого алюминия подвергнуть энергичному сжатию, сопровождаемому значительной пластической деформацией и, как следствие, некоторым местным нагревом, то можно создать условия, необходимые для протекания процесса рекристаллизации без нагрева деталей электрическим током или другим внешним источником тепла, — произойдет „холодная“ сварка.

Обычно контактная сварка производится при температурах собирательной рекристаллизации (например, для стали более 1000°) и более высоких. Так как контактная сварка всегда сопровождается приложением значительного давления, свариваемые этим способом металлы и сплавы должны быть достаточно пластичными при температуре сварки.

Металлы и сплавы, полученные методом горячей прокатки (протяжки, прессования иликовки) при достаточно высокой температуре и давлении, как правило, обладают свойствами, допускающими их сварку давлением. Однако не все металлы и сплавы обладают одинаково хорошей свариваемостью. *Под свариваемостью будем понимать способность материала образовывать при использовании рационального технологического процесса сварки прочное соединение без существенного снижения технических свойств свариваемого материала в самом соединении и в прилегающей к нему зоне термического влияния сварки* (зоне, в которой в результате нагрева при сварке происходят те или иные структурные изменения в основном металле). Из этого технологического определения следует, что свариваемость не является неизменным свойством материала. С усовершенствованием технологии сварки плохо свариваемые материалы могут переходить в группу хорошо свариваемых. Таким образом, вопрос о технологической свариваемости не может рассматриваться в отрыве от самого технологического процесса. В настоящей главе разбираются только основные явления, сопутствующие контактной сварке различных металлов и сплавов и влияющие на их свариваемость. Особенности этих явлений при различных способах контактной сварки рассматриваются в последующих главах.

§ 2. ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ УГЛЕРОДИСТЫХ И НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Углеродистые и низколегированные стали принадлежат к так называемому перлитному классу, так как при охлаждении на воздухе они имеют феррито-перлитную структуру. К ним относятся углеродистые стали с содержанием до 0,8% С и подавляющее большинство конструкционных сталей, применяемых в машиностроении и строитель-



Фиг. 33. Изменение прочности сварной точки в зависимости от температуры в плоскости соединения листов малоуглеродистой стали толщиной $0,7 \pm 0,7$ мм при различных удельных давлениях.

расплавления была рассмотрена в предыдущем параграфе. При нагреве стальных деталей, начиная с некоторой температуры, зависящей от химического состава стали, состояния поверхностей деталей и приложенного давления, может начаться сварка, т. е. образование на границе между плотно сжатыми деталями общих кристаллических зерен. С повышением температуры и давления число таких зерен растет и прочность получаемого сварного соединения увеличивается. При нагреве до температуры сварки соприкасающихся поверхностей, которые никогда не бываю вполне точно пригнаны друг к другу, появляются более или менее толстые пленки окислов. Окислы, остающиеся в соединении после сварки, существенно понижают его механические свойства и в особенности показатели пластичности (удлинение при растяжении, угол загиба, ударную вязкость).

Повышение температуры и удельного давления облегчает сварку стали без расплавления, что иллюстрируется фиг. 33 (К. А. Кочергин). На графике по оси абсцисс отложена температура в месте соединения, при которой производилась точечная сварка листов малоуглеродистой

стали. В частности, в автомобилостроении широко применяются хромистые стали с 0,1—0,5% С; 1—1,5% Cr и хромоникелевые стали с 0,2—0,4% С; 0,8—1,5% Cr; 3—3,5% Ni; в котлостроении — трубы из теплоустойчивой хромомолибденовой стали с 0,12—0,2% С; 0,8—1,2% Cr; 0,4—0,6% Mo; в самолетостроении — сталь хромансиль с 0,15—0,35% С; 0,8—1,1% Cr; 0,8—1,1% Mn; 0,9—1,2% Si; в вагоностроении — хромоникелемедистая сталь типа НЛ-2 с 0,12—0,18% С; 0,5—0,8% Mn; 0,3—0,5 Si; 0,5—0,8% Cr; 0,3—0,7% Ni; S ≤ 0,045% и P ≤ 0,04%.

Рассмотрим отдельно процессы, протекающие при контактной сварке непосредственно в месте соединения и в прилегающем к нему металле (в околошовной зоне). Как уже отмечалось, сварка может осуществляться без расплавления или с расплавлением металла. Сущность процесса сварки без

стали толщиной 0,7 мм, а по оси ординат — значения разрушающей нагрузки, полученные при испытании сваренных образцов (испытания проводились при комнатной температуре). В описываемых опытах сварка производилась при температурах, лежащих в пределах 650—1250°. Из приведенных кривых следует, что увеличение температуры и давления заметно увеличивает прочность соединения. Некоторое понижение прочности в интервале температур 850—900° связано с превращением феррита в аустенит; рекристаллизация аустенита при этих температурах протекает значительно медленнее, чем рекристаллизация феррита. Замедленная рекристаллизация аустенита затрудняет образование общих зерен и ведет к понижению прочности сварного соединения.

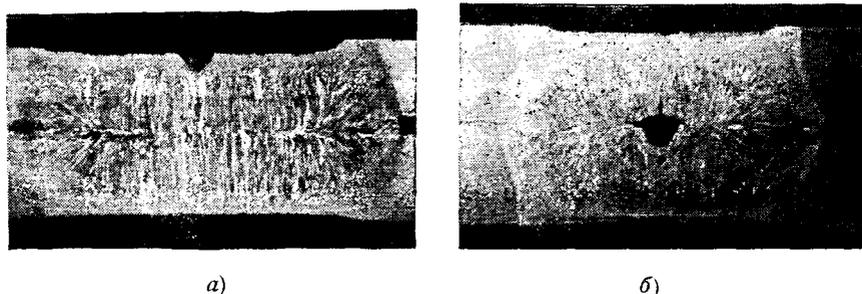
Увеличение содержания в стали углерода, а также наличие в ней легирующих элементов затрудняет сварку без расплавления. Поэтому этот вид контактной сварки (в частности, стыковая сварка сопротивлением) практически применяется только для деталей из малоуглеродистой стали. Причины этих затруднений — пониженная пластичность легированной стали при высоких температурах, относительно легкая окисляемость некоторых легирующих элементов (например, хрома, титана), наличие в некоторых низколегированных сталях стойких карбидов, не растворяющихся в аустените при нагреве до очень высоких температур и замедляющих рост зерна. Сварка без расплавления облегчается при нагреве деталей в защитной атмосфере, исключающей попадание кислорода из воздуха в зону сварки.

Особенностью контактной сварки с расплавлением по сравнению с другими способами сварки плавлением (например, электродуговой и газовой) является, в частности, наличие в момент образования сварного соединения значительного давления (при нагреве и расплавлении металла давление может отсутствовать, например, при стыковой сварке оплавлением).

Действие этого давления приводит к вытеснению из стыка всего металла, расплавленного во время нагрева, если для этого нет существенных препятствий, как, например, при правильно проведенной точечной сварке, когда ядро расплавленного металла окружено кольцом плотно сжатого пластичного металла, задерживающего жидкий металл в ядре (см. гл. I).

Удаление жидкого металла из стыка при осадке может приводить к изменению химического состава стали в зоне сварки по сравнению с основным металлом. Это изменение объясняется тем, что при нагреве стали в первую очередь плавится металл, обогащенный углеродом. Если при осадке жидкий металл вытесняется, то металл, остающийся в зоне стыка, должен иметь пониженное по сравнению с основным металлом содержание углерода. Изменение состава стали вызывается также ее обезуглероживанием при непосредственном воздействии кислорода воздуха. При точечной и роликовой сварке весь расплавляемый металл остается в соединении и не соприкасается непосредственно с атмосферным воздухом. При этом химический состав стали в зоне сварки не отличается от состава основного металла, если на его поверхности перед сваркой не было окислов или специальных покрытий.

Как известно из металловедения, сталь переходит из твердого состояния в жидкое в некотором интервале температур, лежащем между солидусом (температурой начала плавления) и ликвидусом (температурой окончания плавления). В этом интервале температур сталь находится в двухфазном состоянии, т. е. представляет собой смесь жидкого металла, обогащенного углеродом и другими примесями (жидкая фаза), и твердых кристаллов (твердой фазы). Частичное расплавление стали вблизи стыка иногда приводит, помимо неоднородности химического состава металла в зоне сварки, к горячим трещинам, рыхлости, неметаллическим включениям и другим порокам, понижающим качество сварного соединения (см. гл. IV). С увеличением



Фиг. 34. Макроструктура металла сварной точки на стальных листах толщиной 4 мм (С. С. Астафьев):

a — ядро без макродефектов; *б* — ядро с усадочной раковинной.

содержания в стали углерода температурный интервал ее частичного расплавления расширяется. Вследствие этого увеличивается протяженность зоны частичного расплавления и увеличивается опасность возникновения в ней пороков. Это одна из причин того, что с увеличением содержания в стали углерода ее контактная сварка становится труднее.

Загрязнение стали легкоплавкими неметаллическими включениями, в первую очередь сернистыми включениями типа FeS (сульфид железа), ведет к существенному расширению зоны частичного расплавления стали при сварке и к ухудшению качества сварки.

При стыковой сварке оплавлением весь жидкий металл, как правило, удаляется из стыка при его осадке; обнаружить участки литого металла металлографически удается редко. При точечной и роликовой сварке металл, расплавленный во время нагрева, остается в соединении и легко выявляется по структуре стали.

Типичная макроструктура сварной точки с плотным чечевицеобразным ядром показана на фиг. 34, *a*. Ядро имеет дендритную структуру литого металла, являющуюся бесспорным доказательством его расплавления при точечной сварке. Металл в ядре точки при нагреве и расплавлении не может свободно расширяться, а при последующем охлаждении — свободно сжиматься. В результате этого в ядре точки могут образоваться усадочные раковины (фиг. 34, *б*), а при

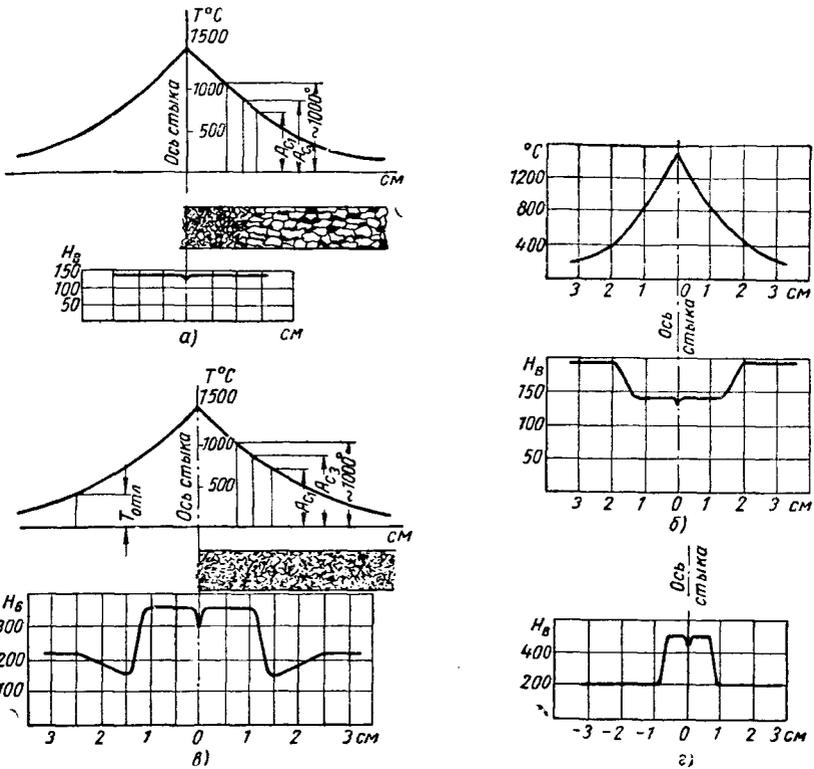
сварке сталей с повышенным содержанием углерода и легированных сталей — трещины. При этом в зоне сварной точки возникают значительные собственные напряжения. Обжатие сваренной точки большим давлением электродов при ее кристаллизации уплотняет металл ядра и способствует уменьшению или полному устранению в нем порочков, связанных с усадкой. При всех видах контактной сварки в околошовной зоне вследствие местного характера нагрева температура изменяется от исходной температуры свариваемых деталей (при сварке без специального подогрева она может приниматься равной 0°) до температуры плавления стали (при сварке с расплавлением) или до $T \approx 1200 \div 1300^\circ$ (при сварке без расплавления).

В результате нагрева и последующего охлаждения в металле околошовной зоны (в зоне термического влияния сварки) происходят различные изменения, влияющие на структуру и механические свойства сварного соединения. *Изменения в зоне термического влияния зависят от химического состава стали, ее предварительной механической (наклеп) и термической обработки, температуры и длительности нагрева и, наконец, скорости охлаждения.* Поведение стали при нагреве и охлаждении в условиях контактной сварки, естественно, следует общим законам термической обработки. Однако при этом следует учитывать две особенности контактной сварки, которые могут оказать существенное воздействие на свойства стали в зоне термического влияния: а) исключительно высокие, в отдельных случаях, скорости нагрева и охлаждения (например, при точечной сварке стали в течение 0,1 сек. скорость нагрева превышает $\frac{1500}{0,1} = 15\ 000^\circ \text{C/сек}$) и

б) нагрев металла внутренними источниками тепла (в отличие от нагрева в печи внешними источниками, когда тепло относительно медленно распространяется от поверхности тела в его глубину).

Рассмотрим изменения, наблюдающиеся при сварке горячекатанной малоуглеродистой стали. На фиг. 35, а показаны возможная кривая распределения максимальных температур в околошовной зоне и схемы соответствующих структур. На участке, где металл был нагрет от исходной температуры до температуры, несколько превышающей точку A_{c_1} (температура превращения перлита в аустенит, равная 723°C), структурных изменений в горячекатанной ненаклепанной стали не произойдет. Здесь наблюдается обычная для малоуглеродистой стали феррито-перлитная структура (фиг. 36, а). На участке, нагретом до температуры, лежащей между A_{c_1} и A_{c_3} (температура окончания перекристаллизации стали, т. е. полного ее превращения в аустенит), сталь проходит частичную перекристаллизацию. Результаты этого процесса в малоуглеродистой стали будут зависеть от скорости нагрева и охлаждения. В подавляющем большинстве случаев точечной сварки и, как правило, при стыковой и роликовой сварке в зоне частичной перекристаллизации после охлаждения сохраняется феррито-перлитная структура (вновь образовавшиеся мелкие зерна перлита окружены старой сеткой феррита). Однако при точечной сварке с очень большой скоростью нагрева участки аустенита, образовавшиеся

при превращении перлита, содержат $0,8\%$ С. Содержание в стали углерода вследствие малой длительности нагрева не успевает выровняться. Если теперь сталь очень быстро охладить, то участки аустенита с высоким содержанием углерода закалятся. В результате этого будет полу-



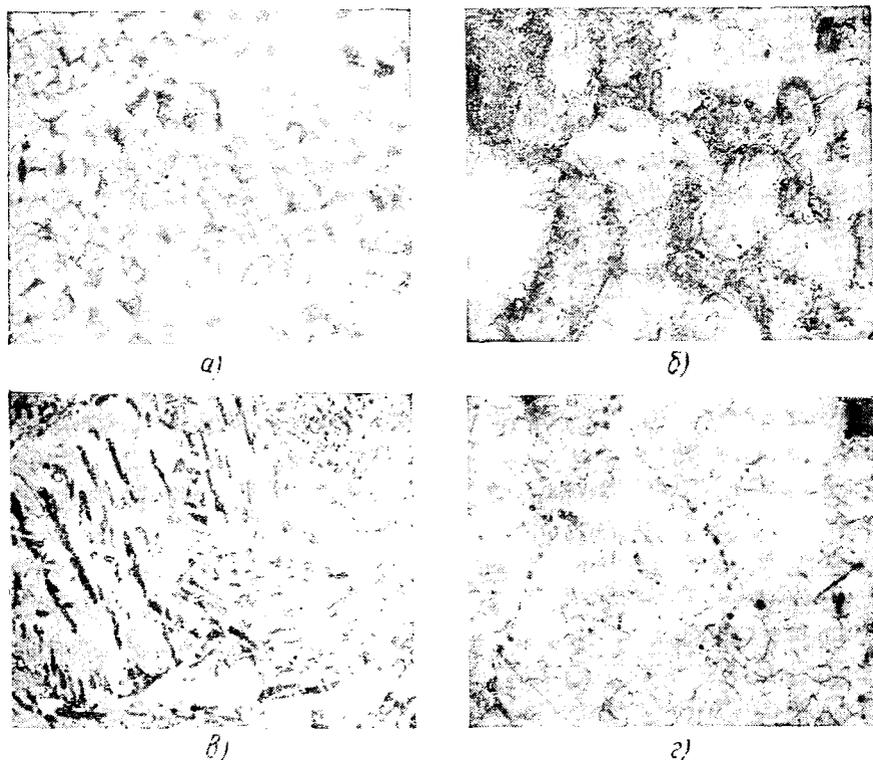
Фиг. 35. Структуры, твердость и изменение температуры в околошовной зоне при сварке перлитных сталей:

а — горячекатанной малоуглеродистой стали; *б* — холоднокатанной малоуглеродистой стали; *в* — предварительно закаленной и отпущенной легированной стали; *г* — диаграмма твердости при сварке той же стали в отожженном состоянии.

чена необычная для малоуглеродистой стали структура хрупкого и твердого мартенсита, окруженного сеткой мягкого феррита (фиг. 36, б). Таким образом, при точечной сварке малоуглеродистой стали возможна местная закалка.

При умеренной скорости нагрева малоуглеродистой стали до температуры, лежащей на $30\text{--}50^\circ$ выше точки A_{c3} , осуществляется полная перекристаллизация стали (переход ее в аустенит) без заметного роста зерна. После охлаждения от этих температур сталь приобретает мелкозернистую феррито-перлитную структуру, сходную со структурой исходного металла. Дальнейший нагрев приводит к росту зерна. Наиболее крупное зерно наблюдается в непосредственной близости к месту сварки. Здесь часто встречается видманштеттова структура, приводя-

щая к резкому понижению пластических свойств стали в сварном соединении и прежде всего его ударной вязкости. Ударная вязкость малоуглеродистой стали в результате образования видманштеттовой структуры может понизиться с $10-12 \text{ кгм/см}^2$ до $2-4 \text{ кгм/см}^2$. Видманштеттова



Фиг. 36. Характерная для контактной сварки микроструктура перлитной стали:

a — феррит + перлит в ненаклепанной малоуглеродистой стали. $\times 125$; *б* — участки мартенсита, окруженные сеткой феррита. $\times 375$ (С. К. Слозберг); *в* — феррит + перлит видманштеттового строения в малоуглеродистой стали в зоне интенсивного роста зерн. а. вблизи стыка. $\times 400$; *г* — сетка мелких включений по границам исходных зерен аустенита при устойчивом перегреве малоуглеродистой стали. $\times 300$ (Н. С. Кабанов).

структура стали (фиг. 36, *в*) характеризуется выделением при остывании стали избыточного феррита не в виде сетки по границам зерен аустенита, а внутри этих зерен параллельными пластинками. Образованию нежелательной видманштеттовой структуры способствуют значительный рост зерен аустенита и малая скорость его охлаждения.

При большой скорости нагрева (порядка 150°C/сек и выше), как показали обширные исследования советских металловедов (В. Д. Садовского, К. А. Малышева и др.) по электротермической обработке стали, температура окончания перекристаллизации повышается до температуры превращения чистого феррита в аустенит (910°C) и заметно растет температура начала интенсивного роста зерна (на $150-200^\circ \text{C}$). Однако

избежать роста зерна при нагреве перлитной стали выше 1150—1200°С не удается ни при какой практически осуществимой скорости нагрева. Обычно сталь, имеющая крупное зерно в результате перегрева, может быть исправлена повторной термической обработкой, например, нормализацией (нагревом до температуры несколько выше точки A_{c3} с охлаждением на воздухе).

В случае относительно медленного нагрева стали, например при стыковой сварке оплавлением с предварительным подогревом, до температуры, близкой к солидусу, возможен так называемый устойчивый перегрев стали, при котором по границам зерен аустенита выделяются мелкие включения, не растворяющиеся при повторной термической обработке (фиг. 36, з). Такая структура сообщает стали хрупкость. Длительная выдержка стали при высоких температурах может привести к ее пережогу, при котором окисляются границы зерен аустенита. В условиях контактной сварки пережог обычно не наблюдается.

При умеренной скорости нагрева и охлаждения твердость горячекатанной малоуглеродистой стали в зоне термического влияния не отличается от твердости основного металла, и только в непосредственной близости к шву (при стыковой сварке) обычно наблюдается незначительное понижение твердости, связанное с уменьшением содержания углерода.

При контактной сварке холоднокатанной малоуглеродистой стали характер изменений структуры и механических свойств в околошовной зоне сложнее, чем при сварке горячекатанной стали с тем же содержанием углерода.

Уже при нагреве до температуры 200—300° в холоднокатанной стали начинается уменьшение внутренних напряжений, вызванных ее наклепом при холодной прокатке, и соответствующее понижение твердости. При медленном нагреве до температуры порядка 450° происходит разупрочнение малоуглеродистой стали (возврат), т. е. понижение ее твердости и предела прочности до значений, соответствующих ненаклепанной стали того же химического состава. Возврат не сопровождается заметными изменениями в структуре стали. При дальнейшем нагреве начинается рекристаллизация холоднокатанной стали, протекающая быстро при температуре выше 650°. При медленном нагреве в результате рекристаллизации возможен значительный рост зерна. Однако при контактной сварке стали время выдержки при температурах рекристаллизации, как правило, недостаточно для такого роста. Процессы, протекающие при нагреве холоднокатанной стали до более высоких температур, не отличаются от описанных выше процессов в горячекатанной стали. Схемы распределения температур и твердости при сварке холоднокатанной стали приведены на фиг. 35, б.

При испытании на растяжение образца, сваренного из холоднокатанной малоуглеродистой стали, разрушение происходит в самом стыке или в околошовной зоне. Вызванное здесь возвратом и рекристаллизацией понижение механических свойств стали не может быть устранено последующей термической обработкой (так как малоуглеродистая сталь не закаливается и, как следствие, не упрочняется при термической об-

работке). Отсюда следует, что контактную сварку холоднокатанной термически необрабатываемой стали необходимо проводить с минимально возможной зоной термического влияния, т. е. при малой длительности сварочного нагрева.

При сварке углеродистых и легированных сталей перлитного класса, восприимчивых к закалке (в условиях сварки), конечная структура, распределение твердости, а также механические свойства зависят от химического состава стали, ее состояния перед сваркой и от условий нагрева и охлаждения. Структурные изменения при сварке легированной конструкционной стали перлитного класса, предварительно закаленной и отпущенной при температуре T_{omn} , схематически представлены на фиг. 35, в. Там же нанесены кривая максимальных температур нагрева при сварке и диаграмма распределения твердости в околошовной зоне.

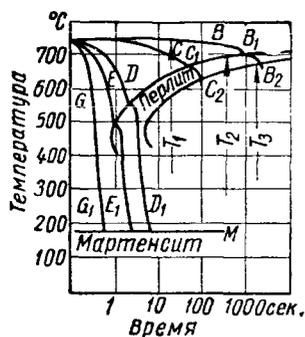
При нагреве стали во время сварки до температуры ниже T_{omn} никаких изменений в структуре и механических свойствах стали не происходит. Нагрев в интервале температур от T_{omn} до A_{c1} вызывает дополнительный отпуск стали, сопровождаемый понижением ее прочности и твердости по сравнению с этими же характеристиками исходного металла, при соответствующем повышении пластичности. Электрический нагрев значительно ускоряет процессы отпуска, заметно сказываясь на свойствах стали даже в условиях контактной сварки, при которой длительность теплового воздействия очень мала.

Сталь, нагретая в диапазоне температур между A_{c1} и A_{c3} , проходит частичную перекристаллизацию. При достаточной скорости охлаждения здесь наблюдается частичная (местная) закалка с постепенным нарастанием твердости от точки, нагретой до температуры A_{c1} , к точке, нагретой до A_{c3} . В зоне, нагретой выше A_{c3} , так же как в ранее рассмотренном случае сварки малоуглеродистой стали, происходит полная перекристаллизация. В непосредственной близости к месту сварки наблюдается интенсивный рост зерна.

Конечная структура стали в зоне, прошедшей при нагреве полную перекристаллизацию, зависит от химического состава стали и от скорости охлаждения, определяемой технологическим процессом. Так, например, углеродистая рельсовая сталь с содержанием 0,6% С при относительно медленном охлаждении после сварки оплавлением с подогревом может иметь в сварном соединении твердость по Бринелю всего лишь на 50—100 единиц выше, чем в основном металле вне зоны термического влияния сварки (твердость исходной стали 220 H_B). Эта же сталь при стыковой сварке оплавлением без подогрева может иметь в зоне стыка твердость, на 150—250 единиц большую, чем у основного металла. При точечной сварке такой стали с длительностью нагрева порядка 0,1 сек. в ядре точки образуется мартенситная структура с твердостью до 600 H_B .

Влияние скорости охлаждения стали на ее структуру наглядно иллюстрируется совмещением С-образной диаграммы изотермического превращения аустенита и кривой охлаждения стали (фиг. 37). Как известно из металловедения, С-образная диаграмма определяет время выдержки при заданной постоянной температуре, необходимое

для начала и окончания превращения аустенита. Например, если аустенит соответствующего химического состава мгновенно переохладить до 630°C , то превращение аустенита (фиг. 37) начнется через 10 сек. и закончится через 100 сек. Хотя С-образные диаграммы строятся для превращения аустенита при постоянной температуре (для изотермического процесса), они позволяют приближенно оценить характер превращений, возникающих при переменной температуре во время охлаждения стали. Например, при медленном охлаждении после стыковой сварки оплавлением с подогревом по кривой *B* аустенит превратится в перлит, причем начало этого превращения определяется точкой B_1 на диаграмме. В действительности температура начала превращения аустенита будет несколько ниже, чем T_2 , так как время, необходимое для того, чтобы началось превращение при постоянной температуре T_2 , недостаточно при переменной температуре, изменяющейся в интервале $T_1 - T_2$. Превращение аустенита в перлит сопровождается выделением некоторого количества тепла. Это приводит к образованию на кривой охлаждения небольшого горизонтального участка. Превращение аустенита в перлит заканчивается в точке B_2 при температуре T_3 .



Фиг. 37. Совмещенная схематическая диаграмма кривых охлаждения перлитной стали с кривыми изотермического превращения аустенита.

При нагреве с большой скоростью и, как следствие, при большой скорости охлаждения (например, при точечной сварке) кривая охлаждения (кривая *G* на фиг. 37) не пересекается с кривой начала перлитного превращения в стали. В результате этого при охлаждении стали ниже температуры, соответствующей точке *M*, произойдет мартенситное превращение, и сталь полностью закалится. При охлаждении стали до промежуточной кривой *D* в точке D_1 начинается образование троостита, которое не успевает завершиться. Часть нераспавшегося аустенита при охлаждении ниже температуры *M* переходит в мартенсит. При этой скорости охлаждения сталь будет иметь структуру неполной закалки, состоящую из троостита закалки и мартенсита.

Как известно из металловедения, форма С-образной диаграммы зависит от химического состава стали. Поэтому при одинаковых условиях сварки (т. е. при одинаковых скоростях охлаждения) конечные структуры различных сталей в зоне стыка могут существенно отличаться друг от друга.

Скорость охлаждения в диапазоне температур $450 - 650^{\circ}\text{C}$, определяющую для большинства конструкционных сталей конечную структуру и свойства металла в зоне сварки, можно изменить, не только регулируя процесс сварки, но и применяя соответствующий подогрев перед сваркой (часто в сварочной машине) или замедленное охлаждение сваренных деталей в теплоизолирующей среде или в печи сразу после окончания сварки. Иногда применяется также дополнительный нагрев

деталей после сварки непосредственно в сварочной машине. В результате этих операций уменьшается скорость охлаждения и уменьшается интенсивность закалки. Типичная структура стали, закаленной в результате термического цикла контактной сварки, показана на фиг. 38. В непосредственной близости к стыку при нагреве образуются крупные зерна аустенита, которые при последующем охлаждении превращаются в крупноигольчатый мартенсит.

Выше были рассмотрены изменения структуры и твердости в околосшовной зоне при сварке легированной или углеродистой стали, прошедшей предварительную закалку с отпуском. В этом случае в зоне, нагретой выше температуры T_{omn} , но ниже температуры A_{c1} , наблюдается понижение твердости (см. фиг. 35, в). При сварке отожженной стали того же химического состава область пониженной твердости и прочности отсутствует, и диаграмма распределения твердости имеет вид, показанный на фиг. 35, г.

Из изложенного следует, что оценка свариваемости конструкционных сталей перлитного класса при контактной сварке должна основываться на следующих данных: пластических свойствах при высоких температурах (чем пластичнее сталь, тем легче она сваривается давлением), диаграмме состояния стали (чем меньше разность температур солидуса и ликвидуса, тем лучше сваривается сталь) и С-образной диаграмме изотермического превращения аустенита (чем больше скорость охлаждения, необходимая для получения структуры мартенсита, тем менее склонна сталь к закалке и тем относительно легче она сваривается).

Наилучшей свариваемостью обладает малоуглеродистая сталь, так как она весьма пластична при высоких температурах, имеет очень малый интервал между температурами солидуса и ликвидуса и мало склонна к закалке. С увеличением в стали содержания углерода ее свариваемость понижается по всем показателям.

§ 3. ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ СТАЛЕЙ АУСТЕНИТНОГО КЛАССА

Стали, сохраняющие при охлаждении на спокойном воздухе структуру аустенита, относятся к аустенитному классу. Эти стали обладают многими ценными свойствами: высокой коррозионной стойкостью (нержавеющие и кислотоупорные стали), значительной прочностью при высоких температурах и малой скоростью ползучести (жаропрочность) и, наконец, жаростойкостью, т. е. малой склонностью к окислению (образованию окалины) при значительном нагреве. Металлы и их сплавы при высоких температурах обладают свойством непрерывно деформироваться (ползти) при



Фиг. 38. Мартенсит при сварке стали. $\times 375$.

неизменной, относительно невысокой нагрузке. Чем больше скорость ползучести, тем скорее исчерпается предел деформационной способности материала и тем относительно скорее произойдет его разрушение. Поэтому малая скорость ползучести, свойственная в различной мере всем аустенитным сталям, является одним из ее наиболее ценных технических свойств.



Фиг. 39. Микроструктура аустенитной стали:

a — аустенит закаленного образца с отдельными карбидами (Э. С. Слепак. $\times 125$); *b* — карбиды хрома по границам зерна аустенита. $\times 500$; *в* — аустенит и карбиды титана в зоне сварки; видны линии сдвига, возникшие при пластической деформации во время осадки (Э. С. Слепак. $\times 500$).

Наиболее распространенным представителем обширного класса аустенитных сталей является хромоникелевая сталь типа 18-9, содержащая 17—19% Cr и 8—10% Ni. При охлаждении до комнатной температуры от $T = 1100 \div 1150^\circ$ эти стали сохраняют однофазную структуру аустенита (фиг. 39, *a*). Однофазное строение и высокое содержание хрома придают стали значительную стойкость против коррозии на воздухе, в морской воде и в других химически активных средах (например, в азотной кислоте). В связи с этим сталь типа 18-9 называется нержавеющей сталью.

На практике широко применяется точечная и роликовая сварка нержавеющей стали, а в отдельных случаях также стыковая сварка оплавлением.

В нержавеющей стали типа 18-9 структура чистого аустенита сохраняется при медленном охлаждении только тогда, когда сталь содержит углерода не более $0,02\%$. Более высокое содержание углерода при медленном охлаждении приводит к появлению в стали большего или меньшего количества карбидов хрома. Если сталь с карбидами хрома вновь нагреть до достаточно высокой температуры (порядка 1100°), то они полностью растворятся в аустените. После быстрого охлаждения (закалки) стали с растворенными карбидами она получит однофазную структуру аустенита, в котором будет находиться весь углерод.

Если закаленную нержавеющую сталь типа 18-9, имеющую однородную аустенитную структуру, нагреть до $500\text{--}800^\circ$, то избыток углерода в стали (сверх $0,02\%$, растворимых в аустените в условиях медленного охлаждения) выделится из твердого раствора, образуя карбиды хрома (фиг. 39, б). Выделение карбидов хрома связано с тем, что хром обладает большим сродством к углероду, чем железо. Карбиды хрома образуются по границам зерен аустенита за счет атомов хрома, расположенных вблизи от этих границ. Аустенит у границ зерен сильно обедняется хромом, что приводит к резкому понижению их коррозионной стойкости. Процесс быстрого разрушения границ зерен под действием химически активной среды носит название межкристаллитной коррозии. В результате межкристаллитной коррозии понижается прочность стали и резко падают ее пластические свойства. Следует отметить, что нержавеющая сталь типа 18-9, нагретая до температуры выше 800° , после охлаждения, несмотря на наличие в стали карбидов хрома, невосприимчива к межкристаллитной коррозии. Это объясняется тем, что причиной межкристаллитной коррозии являются не карбиды хрома сами по себе, а обеднение границ зерен хромом. При нагреве стали до температуры, превышающей 800° , карбиды хрома также образуются, но при этой температуре атомы хрома, растворенные в аустените, приобретают достаточную подвижность для того, чтобы содержание хрома во всему объему зерна аустенита успевало выровняться. При этом происходит незначительное уменьшение среднего содержания хрома в аустените, не оказывающее существенного влияния на коррозионную стойкость стали, и не наблюдается опасного обеднения хромом границ зерен.

Так как образование карбидов хрома по границам зерен связано с перемещением атомов углерода и хрома в твердом железе, т. е. с процессами диффузии, оно требует достаточного времени для своего осуществления. Поэтому чем меньше длительность нагрева стали в опасном интервале температур, тем относительно выше температура опасного выпадения карбидов хрома.

При контактной сварке сталь в околошовной зоне неизбежно нагревается до температур, лежащих в опасном с точки зрения выпадения карбидов интервале. Однако длительность пребывания стали при этих температурах относительно невелика. Поэтому точечная сварка может не вызывать межкристаллитной коррозии.

Для уменьшения опасности выпадения карбидов при сварке применяются хромоникелевые аустенитные стали с низким содержанием углерода

(до 0,07%). Уменьшение чувствительности стали к нагреву достигается также введением в нее при изготовлении специальных легирующих добавок. В качестве таких добавок, стабилизирующих аустенитную сталь, применяются титан и ниобий. Эти элементы обладают большим сродством к углероду (большей карбидообразующей способностью), чем хром, и, образуя карбиды титана — фиг. 39, в (или ниобия), препятствуют образованию карбидов хрома. При достаточном для связывания избыточного углерода количестве титана и ниобия карбиды хрома не образуются, хром распределен равномерно по всему объему зерен аустенита и сталь не склонна к межкристаллитной коррозии. В сталях с добавками титана или ниобия содержание углерода может повышаться до 0,12%.

Поведение аустенитных сталей при контактной сварке и ее технологические режимы определяются следующими особенностями этих сталей:

а) для пластической деформации аустенитной стали при высоких температурах требуются значительно большие напряжения, чем для деформирования малоуглеродистой или другой стали перлитного класса, поэтому при контактной сварке аустенитных сталей должны применяться большие удельные давления осадки, чем при сварке перлитных сталей;

б) аустенитные стали обычно применяются в сварных конструкциях в виде холоднокатанных листов или профилей; при нагреве высокие показатели прочности стали, полученные в результате наклепа при холодной прокатке, резко понижаются, поэтому при контактной сварке аустенитных сталей должны применяться относительно „жесткие“ режимы („жесткие“ режимы сварки характеризуются малой длительностью сварочного нагрева; „мягкие“ режимы — сравнительно большой длительностью нагрева); при сварке на „жестких“ режимах зона нагрева выше температуры разупрочнения стали будет иметь минимальные размеры, и разупрочнение произойдет в очень ограниченной области; применение „жестких“ режимов особенно необходимо при сварке стали, склонной к межкристаллитной коррозии;

в) аустенитные стали обладают сравнительно высоким электрическим сопротивлением и малой теплопроводностью, в связи с этим нагрев аустенитной стали при контактной сварке осуществляется при меньшем токе в сварочной цепи (и соответственно при меньшей мощности сварочной машины), чем при сварке деталей тех же размеров из малоуглеродистой или другой перлитной стали;

г) аустенитные стали обладают высоким коэффициентом линейного расширения при нагреве (например, в интервале температуры 20—1000° аустенитная сталь типа 18-9 имеет $\alpha = 20 \cdot 10^{-6}$, а малоуглеродистая имеет $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}$), что позволяет ожидать значительных деформаций при сварке аустенитных сталей; однако при контактной сварке этих сталей из-за низкой их теплопроводности зона разогрева мала, деформации в ней невелики и не вызывают особых затруднений;

д) некоторые элементы, входящие в состав аустенитных сталей (например, хром), легко окисляются, образуя тугоплавкие окислы и существенно затрудняя получение качественного соединения в тех случаях,

когда свариваемые поверхности при нагреве омываются воздухом, в связи с этим стыковая сварка аустенитных сталей значительно сложнее сварки углеродистых сталей;

е) во многих аустенитных сталях присутствуют стойкие карбиды (например, карбиды титана), нерастворимые в аустените даже при температурах, близких к точке плавления стали; наличие этих карбидов затрудняет пластическую деформацию стали и тормозит рекристаллизацию, это, например, неблагоприятно сказывается на поведении стали при стыковой сварке.

Из изложенного следует, что аустенитные стали должны свариваться точечной и роликовой сваркой на „жестких“ режимах с применением повышенного давления на электроды и пониженной (по сравнению со сваркой малоуглеродистой стали) мощности. Стыковая сварка аустенитных сталей в связи с затрудненной пластической деформацией при высоких температурах и склонностью к окислению вызовет большие трудности, чем сварка малоуглеродистой или другой перлитной стали.

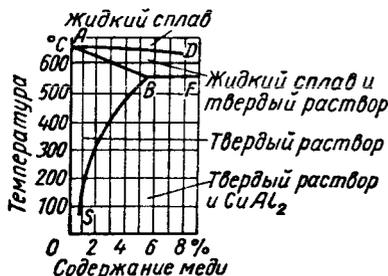
§ 4. ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ АЛЮМИНИЯ И ЕГО СПЛАВОВ

Чистый алюминий обладает высокой тепло- и электропроводностью. Электропроводность алюминия равняется 62% электропроводности меди. Алюминий очень легко окисляется, образуя на поверхности тугоплавкие неэлектропроводные пленки Al_2O_3 . При высоких температурах алюминий обладает значительной прочностью и относительно низкими пластическими свойствами. Например, предел прочности наклепанного алюминия, равный при комнатной температуре 25 кг/мм², при температуре 500° приближается к 28 кг/мм²; относительное удлинение при этой температуре не превышает 15%. Все это затрудняет контактную сварку чистого алюминия. Точечная и роликовая сварка чистого алюминия применяется очень редко, так как требует использования машин очень высокой мощности и связана с быстрым износом электродов. Возможна точечная и роликовая сварка хорошо очищенного алюминия при комнатной температуре без электрического нагрева. Необходимым условием для осуществления „холодной“ сварки является весьма значительная пластическая деформация деталей в месте соединения (обжатие свыше 60%), в результате которой в алюминии протекают процессы интенсивной рекристаллизации, способствующие образованию общих зерен, необходимых для сварки.

Стыковая сварка сопротивлением алюминия вполне возможна, но лучшие результаты получаются при сварке оплавлением. В связи с очень большой склонностью алюминия к окислению оплавление должно протекать очень интенсивно, сопровождаясь быстрой осадкой. Вследствие низкого электросопротивления алюминия для его стыковой сварки (так же как и для точечной) требуется значительная удельная мощность оборудования (мощность, отнесенная к единице площади поперечного сечения свариваемых деталей).

В промышленности приходится часто встречаться с контактной сваркой высокопрочных алюминиевых сплавов. Для упрочнения эти сплавы перед

их использованием в конструкциях подвергаются наклепу (путем холодной прокатки) или специальной термической обработке. Характерным представителем сплавов, упрочнение которых достигается наклепом, является сплав АМц, содержащий 1—1,6% Мп, до 1% Fe и до 1% Si, остальное — Al. Наклепанный сплав (АМцН) обладает следующими механическими свойствами: предел прочности при растяжении не ниже 22 кг/мм², относительное удлинение $\geq 5\%$. Тот же сплав в отожженном состоянии (сплав АМцМ) имеет минимальный предел прочности 13 кг/мм² и относительное удлинение $\sim 20\%$. При нагреве наклепанного сплава до температуры выше 250—300° происходит его частичная



Фиг. 40. Часть диаграммы состояния двойного сплава медь—алюминий.

3,6—4,7% Cu; 1,25—1,75% Mg; 0,3—0,9% Мп; $\leq 0,8\%$ Si и $\leq 0,8\%$ Fe; остальное — Al. Дуралюмин обладает низкой коррозионной стойкостью, в связи с чем он обычно покрывается тонким слоем чистого алюминия (плакируется). Дуралюмин в отожженном состоянии (Д16М) имеет предел прочности не ниже 21 кг/мм² при минимальном относительном удлинении 18%. Плакированный дуралюмин, закаленный и естественно состаренный (Д16Т), имеет предел прочности не менее 42 кг/мм² при относительном удлинении 18%. Высокая прочность термически обработанных сплавов типа дуралюмина объясняется ограниченной растворимостью меди и магния в твердом алюминии.

На фиг. 40 приведена левая часть диаграммы состояния сплава Cu—Al. Алюминий и медь образуют интерметаллическое соединение CuAl₂ (54% Cu и 46% Al). Растворимость меди в алюминии с понижением температуры уменьшается по линии BS. При нагреве дуралюмина под закалку до температуры, лежащей выше линии BS (около 500°), медь и магний, содержащиеся в сплаве, полностью растворяются в твердом алюминии. Быстрое охлаждение сплава (закалка) фиксирует атомы меди и магния в твердом растворе алюминия. Однако такой пересыщенный твердый сплав неустойчив и из него стремятся выделиться мельчайшие (дисперсные) частицы CuAl₂, Al₂CuMg и др. Процесс выделения мелкодисперсных частиц (не обнаруживаемых под микроскопом) носит название старения. Старение сопровождается повышением твердости и прочности сплава при одновременном понижении его электрического сопротивления. При естественном старении дуралю-

или полная рекристаллизация, сопровождаемая разупрочнением. При контактной сварке холоднокатанных алюминиевых сплавов всегда возможно их местное разупрочнение в околошовной зоне.

В группе алюминиевых сплавов, упрочняемых термической обработкой (закалкой с последующим старением), наиболее распространенными являются сплавы типа дуралюмина, представляющие собой тройные сплавы алюминия с медью и магнием. Например, дуралюмин марки Д16 содержит

мина закаленный сплав выдерживается при комнатной температуре. При этом его твердость и прочность повышаются, однако электросопротивление не понижается. Это объясняется тем, что при естественном старении дуралюмина не происходит выделения дисперсных частиц из твердого раствора, а осуществляется только перегруппировка атомов меди и магния, предшествующая выпадению этих частиц. Эта перегруппировка вызывает повышение твердости сплава без изменения его электропроводности. Нагрев естественно состаренного дуралюмина сопровождается понижением его твердости и прочности. Полный отжиг дуралюмина происходит при $340 - 370^\circ$. В связи с этим в околошовной зоне всегда наблюдается местное разупрочнение дуралюмина, тем менее существенное, чем уже зона термического влияния сварочного нагрева.

При нагреве дуралюмина выше $510 - 520^\circ$ происходит местное оплавление поверхности зерен, сопровождающееся при охлаждении образованием по границам зерен эвтектики. В результате такого перегрева (пережога) дуралюмина резко падают его прочность и пластичность.

Таким образом, при контактной сварке алюминиевых сплавов, упрочненных как путем наклепа, так и путем термической обработки, желательнее применение „жестких“ режимов с минимальной зоной термического влияния. Это особенно существенно для сплавов типа дуралюмина, склонных к пережогу. Высокая тепло- и электропроводность алюминиевых сплавов делает целесообразным применение „жестких“ режимов также для сокращения расхода электроэнергии при сварке.

§ 5. ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ МЕДИ И ЕЕ СПЛАВОВ

Контактная сварка меди затруднена ее исключительно высокой тепло- и электропроводностью и узким диапазоном температур, в котором она может свариваться давлением.

Медь, очень пластичная при комнатной температуре, при нагреве до температуры, близкой к точке плавления, становится хрупкой. Медь можно сваривать стыковой сваркой сопротивлением. Однако вследствие узкого температурного диапазона ее свариваемости процесс стыковой сварки должен строго контролироваться, что практически осуществимо только с использованием автоматического оборудования.

Стыковая сварка меди оплавлением практически очень затруднительна, так как из-за интенсивного отвода тепла в глубь нагреваемых деталей не удастся поддерживать устойчивый процесс оплавления (см. гл. IV) и создать на торцах деталей слой расплавленного металла, необходимый перед осадкой для получения качественного сварного соединения.

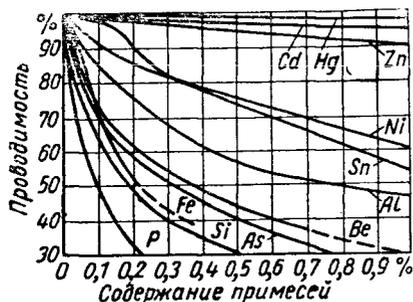
Точечная и роликовая сварка меди возможна только с применением тугоплавких электродов (из вольфрама или молибдена), обладающих более низкой тепло- и электропроводностью, чем медь, и тем самым уменьшающих отвод тепла во время сварочного нагрева. При использовании электродов с низкой теплопроводностью поверхности медных деталей, прилегающие к электродам, очень сильно нагреваются, а местами расплавляются. В результате этого портится внешний вид деталей и очень

велик износ электродов, изготовляемых из дорогостоящих и дефицитных металлов. В связи с этим точечная и роликовая сварка меди практически не применяются.

Медные сплавы (латуни и бронзы) не одинаково хорошо свариваются контактной сваркой. Их свариваемость зависит от химического состава сплава и от его электропроводности.

Отдельные элементы, обычно входящие в состав медных сплавов, оказывают следующее влияние на процесс.

Цинк относительно мало понижает электропроводность (фиг. 41) сплава; вследствие низкой температуры кипения цинка (930°), лежащей ниже температуры плавления не-



Фиг. 41. Влияние примесей на электропроводность меди.

которых латуней, при расплавлении последних во время сварки возможно испарение цинка.

Олово быстро понижает электропроводность сплава; температура кипения олова очень высока, и олово не улетучивается при контактной сварке; олово придает медным сплавам жидкотекучесть и увеличивает разность температур между солидусом и ликвидусом.

Фосфор легко улетучивается при сварке и, действуя на рабочую

поверхность электрода как энергичный раскислитель, ведет к прилипанию электродов к свариваемым деталям; это портит лицевую поверхность деталей и приводит к быстрому износу электродов.

Никель резко понижает электропроводность сплава, облегчая его сварку (контактная сварка медно-никелевых сплавов осуществляется без особых затруднений).

Кремний очень быстро понижает электропроводность медных сплавов; он не летуч при температурах контактной сварки; кремний не снижает пластических свойств сплава при высоких температурах.

Свинец не образует твердых растворов с медью; при нагреве выше температуры плавления свинца между зернами сплава появляются разрушающие его прослойки жидкого свинца.

Сурьма и висмут — вредные примеси в обычных медных сплавах; они не дают с медью твердых растворов, и их действие при сварке аналогично действию свинца.

Из огромного количества медных сплавов, применяемых в различных отраслях промышленности, контактной сваркой чаще других приходится сваривать латуни и кремнистые бронзы.

Свариваемость латуни при контактной сварке зависит от содержания в ней цинка. Относительно лучшей свариваемостью обладают так называемые α -латуни, содержащие 28—33% цинка (например, латунь марки Л68). При этом электропроводность латуни составляет около 28% электропроводности меди. Дальнейшее увеличение содержания цинка в латуни, хотя и ведет к понижению электропроводности сплава,

ухудшает свариваемость латуни вследствие уменьшения ее пластичности при высоких температурах. Уменьшение содержания в сплаве цинка с точки зрения возможности его контактной сварки также нежелательно, так как при этом понижается электрическое сопротивление сплава и требуется применение машин очень большой мощности. Кроме того, с понижением содержания в латуни цинка повышается температура плавления сплава, поэтому в сплавах с невысоким содержанием цинка последний при сварке испаряется легче, чем в латунях, содержащих около 30% Zn.

Кремнистая бронза (до 4% Si) вследствие высокой пластичности и низкой электропроводности (до 10% электропроводности меди) приближается по своей свариваемости при точечной и роликовой сварке к малоуглеродистой стали.

Хорошо свариваются также различные медноникелевые сплавы (например, сплав мельхиор).

Поведение отдельных металлов и сплавов при контактной сварке различными методами несколько подробнее рассмотрено в соответствующих технологических разделах книги.

ТЕХНОЛОГИЯ СТЫКОВОЙ СВАРКИ

§ 1. ТИПОВЫЕ УЗЛЫ И ПОДГОТОВКА ДЕТАЛЕЙ К СВАРКЕ

Как указывалось в гл. I, стыковая сварка может производиться с сопротивлением и оплавлением. Основными условиями получения вполне качественного соединения при любом способе стыковой сварки являются: а) *одинаковый и равномерный по всему сечению нагрев каждой из свариваемых деталей в прилегающей к стыку зоне;* б) *защита в процессе сварки торцов деталей от значительного окисления кислородом воздуха и в) наличие равных возможностей для пластической деформации обеих деталей в околошовной зоне при осадке.* Выполнение этих условий обеспечивается соответствующей геометрической формой деталей вблизи стыка, специальной подготовкой их соединяемых торцов перед сваркой и выбором рационального технологического процесса сварки.

Требования, предъявляемые к форме и к подготовке свариваемых деталей, неодинаковы при сварке с сопротивлением и оплавлением. В первом случае решающее значение имеет плотность прилегания торцов свариваемых деталей до начала их нагрева. При неплотном прилегании торцов в зазоры между ними проникает воздух, при нагреве происходит местное окисление деталей в стыке и резко снижается качество сварного соединения.

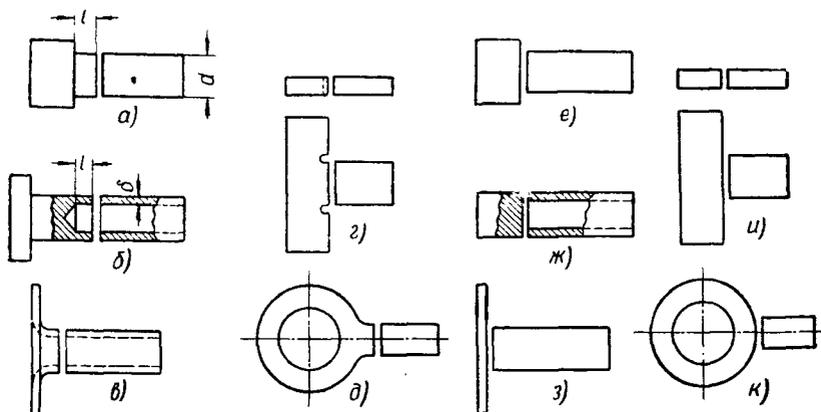
Плотное прилегание торцов достигается тщательной обработкой деталей и их точной установкой в зажимах стыковой машины. Очевидно, что с увеличением сечения и периметра свариваемых деталей, а также с уменьшением их жесткости затрудняется подгонка торцов. Поэтому стыковая сварка с сопротивлением тонкостенных труб, листов и других элементов с развитым периметром сечения не дает положительных результатов и не применяется в промышленности. Практическая применимость этого способа ограничивается сваркой деталей небольшого, компактного сечения (прутков диаметром до 15—20 мм, толстостенных труб малого диаметра). В связи с относительно невысокими показателями прочности соединений, выполненных сваркой с сопротивлением, и жесткими требованиями к подготовке деталей перед сваркой промышленное применение этого метода сварки мало.

Основной способ стыковой сварки — сварка оплавлением. Плоскость стыка обычно перпендикулярна осям свариваемых деталей (фиг. 42, а). В отдельных случаях стык располагается под углом к осям деталей (фиг. 42, б), например, при сварке оконных переплетов. Обе сварива-

емые детали должны иметь вблизи стыка одинаковые или близкие по размерам и форме сечения. Этим обеспечиваются их равномерный нагрев и пластическая деформация при сварке.

Наиболее целесообразные типы соединений сплошных и трубчатых элементов при стыковой сварке оплавлением показаны на фиг. 43, *a—д*. На фиг. 43, *e—к* даны нерациональные соединения. Длина участка *l* при сварке деталей сплошного сечения не должна быть меньше $\frac{a}{2} + 6 \text{ мм}$, а при сварке листов и тонкостенных труб должно обеспечиваться соотношение $l \geq 5\delta + \frac{a}{2}$, где δ — толщина стенки трубы или толщина листа, *a* — общий припуск на оплавление и осадку для двух свариваемых деталей (суммарное укорочение деталей при сварке оплавлением см. § 4 настоящей главы).

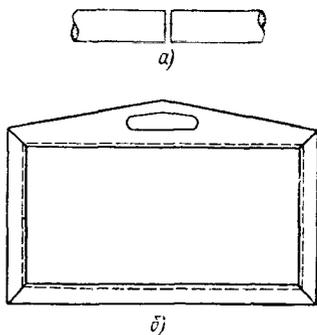
Как указывалось выше, при сварке оплавлением желательно иметь одинаковые сечения свариваемых деталей вблизи стыка. Разница в диаметрах круглых стержней (фиг. 44, *a*) и разностенность труб (фиг. 44, *b*) не должны превышать 15%. При сварке труб, помимо этого, очень существенно отсутствие смещения кромок.



Фиг. 43. Типовые формы деталей при стыковой сварке оплавлением:

a—д — рациональные; *e—к* — нежелательные.

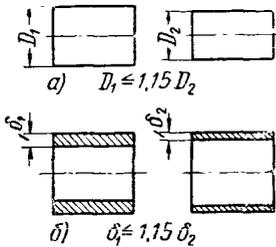
Стыковой сваркой оплавлением успешно свариваются как детали компактного сечения (круг, квадрат, полоса), так и детали с развитым сечением (тонкостенные трубы, тонкие и широкие листы). В настоящее время на специальных стыковых машинах свариваются листы шириной 500—2000 мм при толщине не менее 1,5—3 мм. С уменьшением



Фиг. 42. Расположение стыка по отношению к осям свариваемых деталей:

a — перпендикулярное; *б* — под углом 45° (облицовочная рама автомобиля).

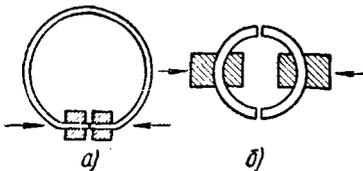
толщины листов увеличивается опасность взаимного смещения кромок, и сварка затрудняется. Чем больше ширина свариваемых листов, тем больше минимальная их толщина, при которой возможна качественная стыковая сварка.



Фиг. 44. Допустимые отклонения в размерах соединяемых деталей при сварке оплавлением круглых стержней (а) и труб (б).

Стыковая сварка применяется как для соединения прямолинейных деталей, так и для образования деталей замкнутого контура (венцы шестерен, колеса, звенья цепей). Стыковая сварка оплавлением может быть использована для получения продольных стыков тонкостенных барабанов (например, в производстве бочек и другой тары) и труб.

Кольца большого диаметра обычно свариваются с одним стыком (фиг. 45, а); кольца малого диаметра и втулки — с двумя (фиг. 45, б). Необходимость применения двух стыков вызывается затруднениями при деформировании жесткого кольца в момент сближения свариваемых торцов и значительным шунтированием тока (см. гл. II). Для удобного зажатия заготовки в губках машины и обеспечения соосности ее концов участка кольца, прилегающие к стыку, часто выпрямляются перед сваркой (фиг. 45, а). Такая заготовка после сварки подвергается правке. Стыковая сварка позволяет заменить сложные поковки сочетанием более простых (фиг. 46, з) или комбинацией из поковок, штамповок и



Фиг. 45. Сварка встык оплавлением кольцевых деталей:

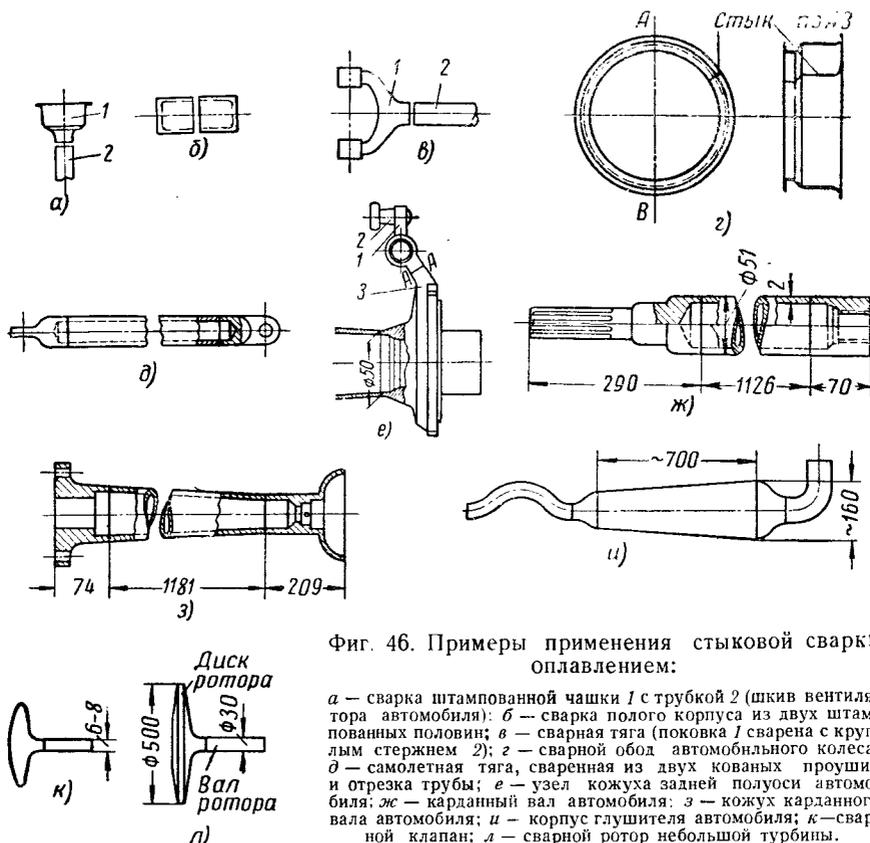
а — с одним стыком (заготовка со спрямленными концами); б — с двумя стыками.

деталей, полученных непосредственной вырезкой из проката (фиг. 46, б, ж, д, л). При этом отдельные заготовки могут поступать на сварку в механически и термически обработанном виде, что значительно уменьшает общую трудоемкость изготовления узла. Например, подвеска рессоры автомобиля 1 с запрессованным пальцем 2, прошедшим закалку, приваривается в обработанном виде по сечению А—А к фланцу 3 кожуха задней полуоси (фиг. 46, е). Стыковую сварку широко используют для получения штампованных конструкций в массовом производстве (автомобилестроении), обеспечивая изготовление узлов сложной

Таблица 5
Минимальная толщина стенки при сварке оплавлением труб различного диаметра

Толщина стенки в мм	Диаметр трубы в мм
0,5	12
1,5	38
2,5	75
4,5	150
8,0	375
12,5	500

формы с минимальной затратой труда и металла (фиг. 46, а, б, и). Стыковая сварка дает возможность надежно соединять детали из неоднородных материалов. В ряде случаев это обеспечивает экономию дорогостоящих легированных сталей и цветных металлов. Например, в инструментальном деле свариваются встык быстрорежущая сталь и ее заме-



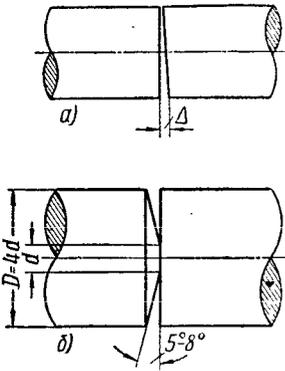
Фиг. 46. Примеры применения стыковой сварки оплавлением:

а — сварка штампованной чашки 1 с трубкой 2 (шкив вентилятора автомобиля); б — сварка полого корпуса из двух штампованных половинок; в — сварная тяга (поковка 1 сварена с круглым стержнем 2); г — сварной обод автомобильного колеса; д — самолетная тяга, сваренная из двух кованых проушин и отрезка трубы; е — узел кожуха задней полуоси автомобиля; ж — карданный вал автомобиля; з — кожух карданного вала автомобиля; и — корпус глушителя автомобиля; к — сварной клапан; л — сварной ротор небольшой турбины.

нителю с углеродистой сталью; при изготовлении выхлопных клапанов двигателей внутреннего сгорания к заготовке из жаропрочной стали приваривается хвостовик из конструкционной стали. После высадки головки получается деталь, показанная на фиг. 46, к. Диск ротора турбины (фиг. 46, л) из жаропрочной стали может привариваться к валу из конструкционной стали.

Подготовка торцов деталей перед сваркой оплавлением может производиться различными способами: отрезкой на прессе, ножницах, механической пиле или металлорежущем станке, а также путем газовой резки с последующей очисткой поверхности реза от шлака (зубилом). Тот или иной способ подготовки выбирается в зависимости от размеров и формы деталей, способа выполнения сварки (автоматический или неавтоматический процесс) и имеющегося в наличии оборудования. При

автоматической сварке требуется более точная подготовка торцов (отклонение от перпендикулярной плоскости — размер Δ на фиг. 47, а — не должно превышать 0,2—0,3 мм), чем при неавтоматическом процессе (Δ должно быть не более 0,15а, где а — припуск на оплавление). Особенно точная подготовка необходима при сварке листов и тонкостенных труб. В связи с этим заготовки малой толщины, а также детали, подлежащие автоматической сварке, должны отрезаться механически.



Фиг. 47. Подготовка торцов при сварке оплавлением:

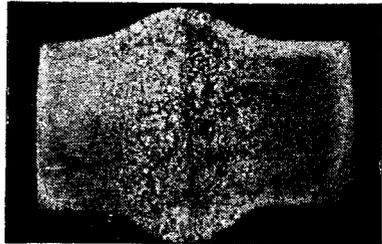
а — без специальной разделки;
б — конусная подготовка круглых деталей большого диаметра для автоматической стыковой сварки

При сварке оплавлением деталей большого сечения иногда практикуется скос одного из торцов (фиг. 47, б), облегчающий начальный разогрев деталей, необходимый для поддержания устойчивого процесса оплавления.

При любом способе стыковой сварки поверхность деталей, касающаяся токоподводящих электродов, должна быть очищена для получения надежного электрического контакта. Очистка производится стальной щеткой или наждачным кругом; в массовом производстве возможны опескоструивание и травление деталей.

§ 3. СВАРКА СТАЛИ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

В настоящее время сварка сопротивлением применяется только для соединения проволоки диаметром до 6—8 мм и прутков диаметром до 20 мм (при изготовлении цепей, см. § 7, гл. IV). Этим способом относительно легко сваривается малоуглеродистая сталь. Однако и в этом случае прочность сварного соединения часто уступает прочности основного металла. Особенно резко снижаются в зоне стыка пластические свойства металла (в первую очередь, ударная вязкость). Низкие механические свойства сварного соединения (например, ударная вязкость порядка 2—5 кгм/см²) связаны с цепочками окислов в стыке (см. фиг. 32) и с широкой зоной крупного зерна. Большая протяженность этой зоны вызывается интенсивным разогревом деталей на значительной их длине (см. кривую А на фиг. 21, б). Типичная макроструктура соединения, сваренного сопротивлением, приведена на фиг. 48. Преимуществом сварки сопротивлением является плавное очертание деталей вблизи стыка. Это особенно ценно при сварке труб, когда требуется сохранение максимального внутреннего диаметра в месте стыка. При сварке сопротивлением



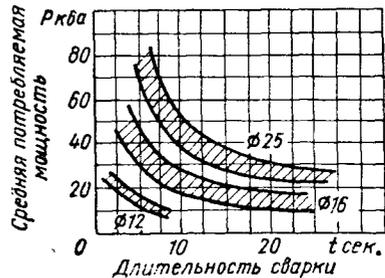
Фиг. 48. Макроструктура соединения стержней из малоуглеродистой стали, выполненного стыковой сваркой сопротивлением.

этот диаметр остается почти без изменений, в то время как при сварке оплавлением образующийся в трубе грат и высаженный металл приводят к существенному местному уменьшению ее диаметра. Несмотря на сложность удаления грата и высаженного металла, сварка труб оплавлением повсеместно вытеснила сварку сопротивлением, которая, как уже отмечалось, дает соединения с недостаточно высоким и очень неоднородным качеством.

Основные параметры сварки, задаваемые технологическим процессом, называются режимом сварки. Режим сварки сопротивлением определяется следующими главными параметрами; током (или мощностью), длительностью сварочного нагрева, давлением осадки и установочной длиной деталей (длиной концов деталей, выступающих из электродов). Ток и длительность нагрева определяют зависимость от них параметр — температуру нагрева деталей. Давление осадки часто определяется косвенно припуском на осадку, т. е. укорочением деталей при их сжатии.

При стыковой сварке сопротивлением малоуглеродистой стали плотность тока (отношение общего тока к площади поперечного сечения свариваемых деталей) может колебаться в широких пределах (от 10 до 100 а/мм^2). Обычно она составляет 20—60 а/мм^2 . Обычно при сварке деталей небольшого диаметра в связи со значительными в этом случае потерями тепла лучеиспусканием. Необходимая плотность тока связана с заданной длительностью нагрева (определяющей производительность процесса); чем „жестче“ режим сварки, тем больше требуемая плотность тока. Ориентировочный расчет плотности тока при заданной длительности процесса возможен по формуле (22).

Потребляемая мощность зависит от требуемой для сварки силы тока и от конструкции сварочной машины. Мощность, так же как и ток, зависит от заданной длительности нагрева. Например, прутки диаметром 16 мм могут быть сварены при мощности от 10 до 60 квa (фиг. 49). Обычно при стыковой сварке сопротивлением деталей компактного сечения удельная мощность лежит в пределах 0,12—0,15 квa/мм^2 , повышаясь при сварке труб до 0,20 квa/мм^2 . Температура нагрева в деталях является важнейшим параметром процесса сварки сопротивлением, однако из-за относительной сложности ее контроля при кратковременном нагреве она редко задается технологическим процессом. Сварка сопротивлением малоуглеродистой стали возможна в интервале температур 900—1250°С. Практически сварка ведется при $T = 1200 \div 1250^\circ$, так как при этой температуре облегчается пластическая деформация металла и быстро идет рекристаллизация.



Фиг. 49. Зависимость потребляемой при сварке мощности от длительности нагрева стержней из малоуглеродистой стали различного диаметра (К. А. Кочергин).

Длительность нагрева обычно лежит в пределах 0,5—15 сек, сварка проволоки диаметром до 8 мм продолжается 1—2 сек.

Усилие осадки существенно влияет на качество соединения. Оно обычно задается удельным давлением (отношением усилия осадки к площади поперечного сечения свариваемых деталей). Удовлетворительная сварка деталей, нагретых до $T \approx 1200^\circ$, возможна при удельном давлении осадки $p = 1,5 \div 3 \text{ кг/мм}^2$. При сварке на неавтоматических машинах с ручным приводом механизма осадки процесс вначале ведется с меньшим удельным давлением ($1-1,5 \text{ кг/мм}^2$). Этим достигается увеличение контактного сопротивления между торцами свариваемых деталей и повышается интенсивность выделения тепла в зоне сварки, что ведет к лучшему использованию мощности сварочной машины. В конечной стадии удельное давление увеличивается.

При описанных выше условиях нагрева и осадки стальные детали диаметром 4—10 мм укорачиваются при сварке на 1,5—2,5 мм. Это укорочение компенсируется соответствующим припуском на осадку, в связи с чем длина каждой детали перед сваркой должна быть увеличена на половину этого припуска.

§ 3. ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ ОПЛАВЛЕНИЕМ

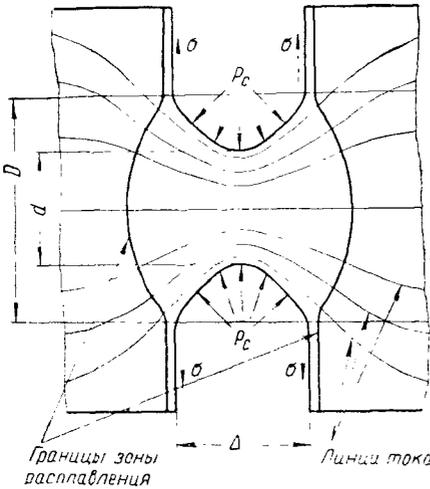
Контактная стыковая сварка оплавлением является одним из широко распространенных технологических процессов, имеющих очень большое народнохозяйственное значение. Особенности этого процесса в общих чертах были изложены в гл. I. Рассмотрим некоторые его детали.

Сварка оплавлением может осуществляться в трех технологических вариантах: без подогрева, с подогревом оплавлением, с подогревом сопротивлением.

Принципиально более простой является сварка непрерывным оплавлением. Весь процесс в этом случае состоит из двух основных этапов: оплавления и осадки. Осадку начинается при включенном сварочном токе (осадка под током) и заканчивается при выключенном токе (осадка без тока).

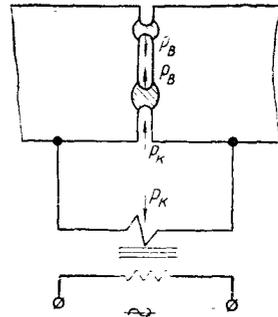
При сварке оплавлением детали зажатые в электродах машины сближаются при включенном токе до соприкосновения. При этом в одной или нескольких точках на их торцах образуется электрический контакт. Так как при оплавлении детали касаются друг друга без существенного давления, электрическое сопротивление этих контактов очень велико. Вследствие этого ток, протекающий в сварочной цепи машины, очень быстро нагревает металл в непосредственной близости к контакту. При этом между торцами деталей образуется одна или несколько перемычек расплавленного металла. Одна такая перемычка схематически показана на фиг. 50. Размеры и количество перемычек зависят от природы свариваемого металла, сечения деталей и параметров сварочного режима. Например, при оплавлении деталей сечением 400—500 мм² из малоуглеродистой стали зазор между торцами деталей Δ колеблется от 0,1 до 0,4—0,5 мм; при этом диаметр основания перемычки D лежит в пределах 2—6 мм. Вес расплавленного металла в одной перемычке

достигает нескольких миллиграммов. Форма и размеры перемычки определяются действием двух основных сил: поверхностного натяжения σ , стремящегося при сближении деталей (уменьшении зазора Δ) увеличить внутренний диаметр перемычки d , и сил так называемого сжимающего эффекта P_c , стремящихся сжать и разорвать обтекаемый электрическим током проводник. Разрывающее проводник усилие возрастает с увеличением отношения $\frac{D}{d}$. Это усилие пропорционально квадрату силы тока в проводнике.



Фиг. 50. Схема внутренних сил, действующих на перемычку расплавленного металла при оплавлении и определяющих ее форму.

При наличии более чем одной перемычки между ними действуют электромагнитные силы притяжения P_B , (фиг. 51), стре-



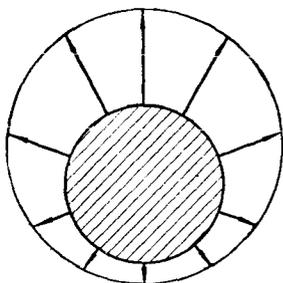
Фиг. 51. Схема электромагнитных сил взаимодействия токов в перемычках при оплавлении.

мящиеся объединить несколько перемычек в одну большую. Из-за малой длительности существования перемычек (см. ниже) это объединение, как правило, не успевает завершиться.

Перемычка расплавленного металла не остается неподвижной. Она перемещается в зазоре между торцами деталей под действием электромагнитной силы P_k , которая возникает в проводнике, являющемся частью замкнутого контура. Эта сила, направленная в сторону, противоположную сварочному трансформатору (как правило, трансформатор размещается внутри машины), также пропорциональна квадрату силы тока. Под действием этой силы перемычка перемещается со скоростью, достигающей 5—6 м/сек.

В момент нулевого значения переменного тока, протекающего в сварочной цепи, перемычка находится только под действием поверхностного натяжения σ (см. фиг. 50), при этом ее средний диаметр d достигает своего максимального значения. С увеличением тока силы сжимающего эффекта (P_c) быстро растут, сечение перемычки уменьшается, плотность тока в ней увеличивается и быстро повышается ее температура. При этом внутри перемычки появляются пары металла, которые вследствие

очень большой скорости нагрева вызывают взрыв жидкой оболочки перемычки. В результате этого взрыва частицы расплавленного металла выбрасываются в виде искр из зазора между торцами деталей. Существование и взрыв перемычки наглядно подтверждаются ускоренной киносъемкой процесса оплавления (например, при съемке со скоростью 3000 кадров в секунду). Такая съемка показала, что взрыв продолжается меньше $\frac{1}{1000}$ сек., причем начальная скорость выбрасываемых во время взрыва частиц металла достигает при взрыве 50 м/сек.



Место
расположения
сварочных
трансформаторов

Фиг. 52. Схема распределения частиц, выбрасываемых из зазора при оплавлении.

Перемычка может разрушиться как в центральной части сечения, так и у его границы. При взрыве перемычки, перемещающейся под действием силы P_k , большая часть образующихся частиц металла вылетает в направлении, противоположном сварочному трансформатору. Количество вылетающих в различных направлениях частиц характеризуется диаграммой на фиг. 52.

При интенсивном, устойчивом процессе оплавления в течение каждого полупериода переменного тока (0,01 сек.) происходит около пяти взрывов перемычек. Общее количество взрывов в течение 1 сек. достигает 500 и более. Последовательные взрывы перемычек создают впечатление непрерывного потока искр, характерного для процесса оплавления, и сопровождаются постепенным укорочением оплавляемых деталей, которые для поддержания непрерывного, устойчивого процесса должны плавно сближаться с соответствующей скоростью.

При взрыве перемычки на торцах остаются лунки-кратеры, диаметр которых соответствует диаметру основания перемычки (см. фиг. 50). С увеличением диаметра кратеров увеличивается и их глубина.

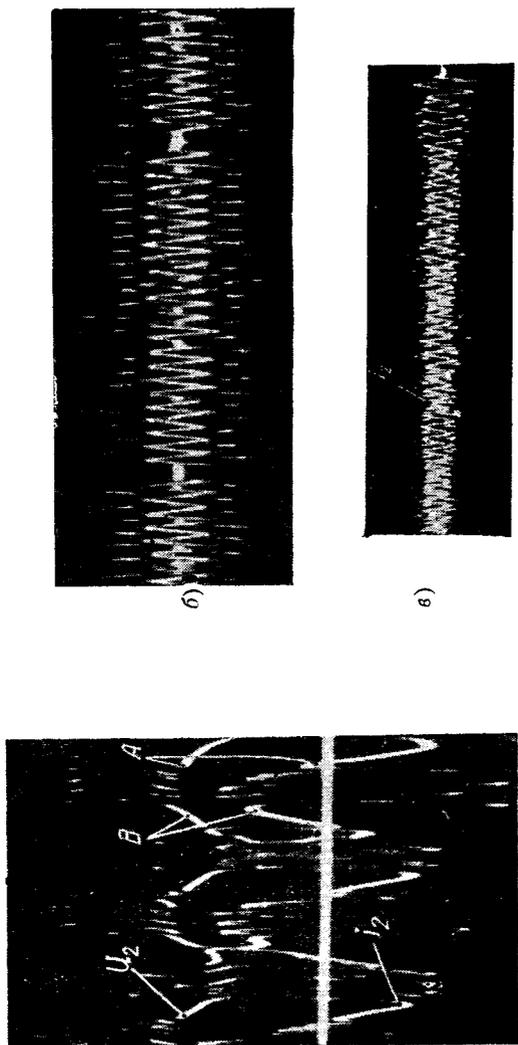
Оплавление сопровождается характерными электрическими процессами. Наиболее наглядное представление об этих процессах дают осциллограммы напряжения на губках сварочной машины и тока, протекающего в сварочной цепи. Осциллограммы получают путем фотографической записи на движущуюся киноплёнку изменения изучаемой величины (ток или напряжение воздействуют на чувствительный зеркальный гальванометр — вибратор; отражаемый зеркальцем вибратора луч света прочерчивает на пленке или фотобумаге соответствующую осциллограмму). На фиг. 53, а приведены осциллограммы напряжения u_2 и тока i_2 в момент устойчивого процесса оплавления. При переходе тока через нулевое значение (точка А) ток и напряжение изменяются по синусоидальному закону. В точке В начинается разрушение перемычек, сопровождаемое резким уменьшением тока. Это уменьшение тока вызывает мгновенный рост напряжения. Последовательно образующиеся и разрушающиеся перемычки ведут к характерным пульсациям тока и напряжения, наблюдаемым, как

правило, на осциллограммах тока и напряжения при оплавлении. На фиг. 53, б приведена осциллограмма сварочного тока при оплавлении, записанная с относительно небольшой скоростью пленки. На этой осциллограмме видны отдельные участки небольшой протяженности, соответствующие 1—3 периодам переменного тока промышленной частоты, на которых процесс оплавления прерывался ($i_2 = 0$). Эти перерывы, незаметные для сварщика, не вооруженного специальным прибором (осциллографом), указывают на не вполне стабильный ход оплавления. Осциллограмма устойчивого процесса приведена на фиг. 53, в.

Интенсивность оплавления и его устойчивость могут оказывать существенное влияние на качество сварного соединения. Объясняется это тем, что при взрыве перемычек частицы металла, нагретые до высокой температуры, энергично окисляются, понижая содержание кислорода в зазоре между оплавляемыми торцами. Повышенное давление в этом зазоре, вызываемое следующими друг за другом взрывами, затрудняет доступ в зазор воздуха. Кроме того, при сварке сталей выгорает углерод, в связи с чем содержание кислорода в зазоре дополнительно понижается, а атмосфера, омывающая торцы, обогащается окисью углерода (CO) и углекислым газом (CO₂). Например, газ, взятый из зоны сварки при устойчивом оплавлении труб из малоуглеродистой стали, содержал около 2—4% кислорода, примерно 1% CO и 2% CO₂. Такая атмосфера может существенно понизить интенсивность окисления оплавляемых торцов, облегчая получение качественного соединения. При неустойчивом оплавлении содержание кислорода в зазоре между торцами возрастает, и повышается окислительная способность омывающей торцы атмосферы. Окислительная способность газовой среды в зазоре между торцами уменьшается с увеличением скорости оплавления (при условии устойчивого протекания процесса оплавления).

Нагрев при оплавлении был рассмотрен в гл. II. Необходимо подчеркнуть две его особенности: с увеличением скорости оплавления (см. фиг. 27) уменьшается ширина зоны интенсивного нагрева деталей и понижается температура в непосредственной близости к стыку.

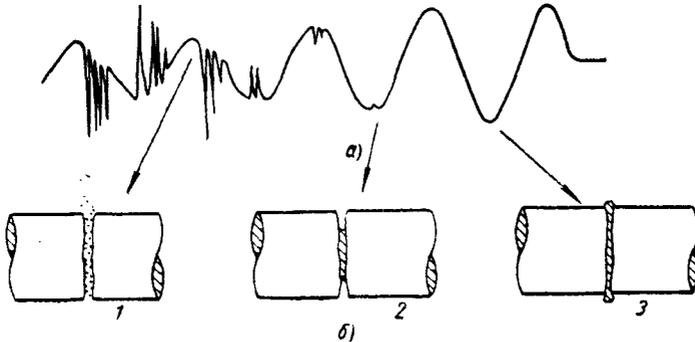
Второй этап сварки оплавлением — осадка, как указывалось выше, состоит из осадки под током и осадки без тока. В связи с переходом от оплавления к осадке очень большое значение имеет осадка под током. При осадке скорость подачи подвижной плиты машины резко возрастает (по сравнению со скоростью оплавления). При этом зазор между торцами оплавляемых деталей начинает быстро уменьшаться. Уменьшение зазора затрудняет разрушение перемычек — сечение перемычки увеличивается настолько, что ее взрыв становится невозможным. Таким образом, оплавление прекращается. Постепенный переход от оплавления к короткому замыканию между торцами хорошо виден на осциллограмме (фиг. 54, а). По мере сближения торцов уменьшается число перемычек, разрушающихся в течение одного полупериода. Наконец, характерные для оплавления пульсации полностью исчезают, напряжение падает, а ток растет — наступает короткое замыкание торцов (осадка под током). Очень существенно, чтобы переход от оплавления к осадке совершался с большой скоростью. При этом переходе



Фиг. 53. Осциллограммы напряжения (u_2) на электродах стыковой машины и тока (i_2) в сварочной цепи:

a — в момент устойчивого оплавления (скорость пленки $v = 250$ мм/сек); *б* — при не совсем устойчивом оплавлении ($v = 100$ мм/сек); *в* — при вполне устойчивом оплавлении ($v = 100$ мм/сек).

всегда возможны моменты, когда разрушение перемычек и связанное с ним защитное действие газовой среды, создаваемой в зазоре между торцами при оплавлении, исчезает, а зазор между торцами еще не полностью закрыт. Постепенное закрытие зазора в начале осадки иллюстрируется схемами на фиг. 54, б. Относительно малая перемычка, взрывающаяся во время оплавления (фиг. 54, б1), при уменьшении зазора в начале осадки резко увеличивается (фиг. 54, б2) — оплавление прекращается, но зазор не закрыт. Наконец, при дальнейшем сближении торцов зазор закрывается полностью, и часть расплавленного металла



Фиг. 54. Типичная осциллограмма тока при переходе от оплавления к осадке (а) и схема закрытия зазора между торцами (б):

1 — разрушение перемычки в конце оплавления; 2 — не полностью закрытый зазор в начале осадки; 3 — зазор закрыт полностью, расплавленный металл вытесняется из зазора.

из зазора выдавливается в виде грата (фиг. 54, б3). Чем быстрее идет осадка, тем меньше время металл в не полностью закрытом зазоре подвергается окислению и, как следствие, тем выше качество получаемого сварного соединения.

Преждевременное выключение сварочного тока, т. е. недостаточная осадка под током, так же как малая скорость осадки, например из-за зазоров в приводе машины, могут существенно понизить качество сварного соединения. Это вызывается двумя причинами: во-первых, интенсивным окислением металла при замедленном закрытии зазора без защитного действия газовой среды, создающейся в процессе оплавления, и, во-вторых, возможным остыванием расплавленного металла на торцах, затрудняющим его последующее выдавливание из зазора при осадке.

Второй этап осадки — осадка без тока — завершает сварочную операцию, заканчиваясь при значительном удельном давлении в стыке. Величина этого давления должна быть достаточной для вытеснения из стыка всего расплавленного металла и для пластического деформирования металла в зоне, непосредственно прилегающей к стыку. Необходимое удельное давление осадки зависит от трех основных факторов: а) рода свариваемого материала (необходимое давление осадки при сварке металлов, относительно трудно деформируемых при высоких

температурах, например, нержавеющей стали, повышается), б) необходимой степени деформации (величины осадки), которая зависит от степени неровности оплавленных торцов; последняя определяется размерами свариваемых деталей и технологическим процессом сварки (с увеличением сечения деталей увеличивается глубина лунок на торцах и увеличивается необходимая величина осадки), и в) температуры в зоне стыка.

В связи с этим удельное давление осадки должно быть наибольшим при сварке деталей большого сечения на автоматических стыковых машинах большой мощности, осуществляющих оплавление без предварительного подогрева (в этом случае зона интенсивного разогрева деталей имеет минимальную ширину, что затрудняет пластическую деформацию). При стыковой сварке широких тонких листов вследствие недостаточной равномерности нагрева по длине свариваемой кромки приходится применять удельные давления осадки, повышенные по сравнению со сваркой деталей компактного сечения.

Пластическая деформация при осадке, естественно, сопровождается укорочением деталей. Это укорочение должно быть компенсировано соответствующим припуском на осадку, величина которого определяется размерами свариваемых деталей (площадью и формой их свариваемого сечения) и условиями нагрева при сварке. Обычно укорочение при осадке (величина осадки) лежит в пределах 2—8 мм. Оно практически не зависит от марки свариваемой стали.

Степень осадки в зависимости от конструкции сварочной машины контролируется или по усилию (осадка проводится при заданном усилии, величина осадки может колебаться) или по величине осадки (осадка всегда заканчивается при строго определенном укорочении деталей, а величина фактического усилия, необходимого для ее осуществления, колеблется в широких пределах). Второй способ требует большей механической мощности сварочной машины (так как при случайном недостаточном нагреве деталей их осадка на заданную величину может вызвать очень существенное повышение необходимого давления осадки), но обеспечивает, как правило, более стабильное качество сварных соединений.

Для обеспечения качественной сварки обе детали перед началом осадки должны быть равномерно нагреты в прилегающих к стыку зонах до одинаковых температур. Связанные с этим конструктивные требования к деталям были рассмотрены в предыдущем параграфе (см. фиг. 43 и 44). Технологически одинаковый нагрев обеих деталей достигается соответствующим выпуском их концов из токоподводящих электродов машины (этот выпуск называется также установочной длиной свариваемых деталей). При сварке деталей из одинакового материала их установочные длины равны. При сварке деталей из неодинакового материала деталь с большим электрическим сопротивлением и меньшей теплопроводностью, как правило, сваривается с меньшей установочной длиной. В этом случае более интенсивное тепловыделение компенсируется усиленным отводом тепла в относительно близко расположенные, хорошо охлаждаемые медные электроды.

Чем больше установочная длина деталей, тем равномернее их нагрев в зоне сварки. Чрезмерное увеличение установочной длины нежелательно, а в некоторых случаях совершенно недопустимо, так как может привести при осадке к выпучиванию деталей (потере устойчивости). При сварке деталей компактного сечения установочная длина назначается кратной диаметру круглых деталей или стороне квадрата (при деталях квадратного сечения). При сварке тонких листов установочная длина рассчитывается так, чтобы по окончании сварки каждый лист выступал из соответствующего зажима не более чем на $1,5-2\delta$, где δ — толщина листа.

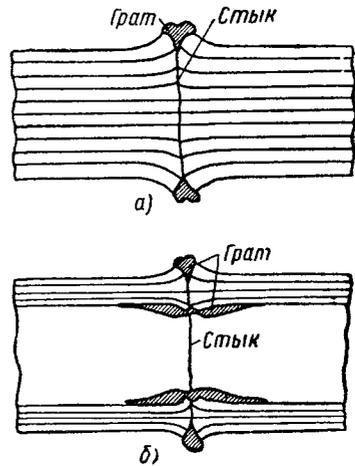
Сварное соединение деталей компактного сечения имеет в разрезе форму, показанную на фиг. 55, а. На периферийных участках сечения наблюдается искривление волокон тем большее, чем больше размеры свариваемого сечения. Кроме местного увеличения размеров деталей в околостыковой зоне, вызываемого пластической деформацией при осадке, вытесненный из стыка металл образует утолщение неправильной формы — грат. При сварке труб (фиг. 55, б) внутри трубы грат образуется не только при осадке, но и во время оплавления. Частицы металла, вылетающие при оплавлении внутрь трубы, оседают на противоположной ее стенке, создавая там более или менее значительное утолщение.

Наглядное представление о ходе сварки непрерывным оплавлением дает график

(фиг. 56, а), в котором по оси абсцисс отложено время, прошедшее от начала сварки, а по оси ординат — перемещение плиты (s) за рассматриваемый промежуток времени и мощность (P), потребляемая из сети. На графике видны плавное перемещение плиты с постепенно нарастающей скоростью и резкое увеличение мощности в момент осадки.

На практике процесс сварки оплавлением часто усложняется введением дополнительной операции — подогрева. Подогрев осуществляется чередованием замыканий и размыканий свариваемых деталей при включенном токе с возбуждением при каждом замыкании кратковременного процесса оплавления (подогрев прерывистым оплавлением) или путем сближения торцов деталей до их упора и пропуска через них серии последовательных импульсов тока (подогрев методом сопротивления). Схематические графики сварки непрерывным оплавлением, с подогревом сопротивлением и прерывистым оплавлением показаны на фиг. 56, б и в.

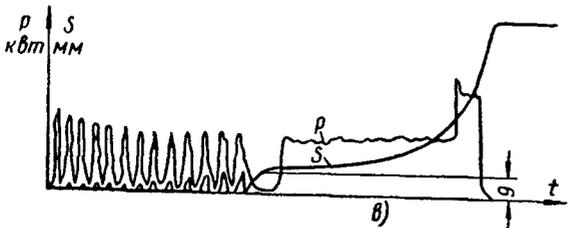
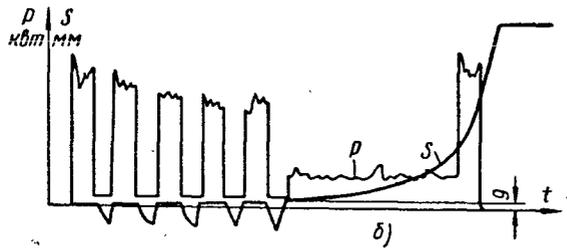
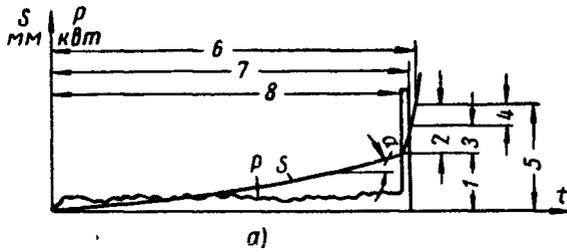
Подогрев сопротивлением идет с очень малым укорочением нагреваемых деталей. При этом потребляется значительная мощность, уменьшающаяся по мере повышения температуры деталей. Подогрев оплавлением протекает при относительно небольшой мощности и сопро-



Фиг. 55. Схема сечения деталей, сваренных оплавлением:

а — круглые стержни; б — трубы (тонкими линиями показано направление волокон).

вождается некоторым укорочением детали (на величину, обозначенную цифрой 9 на фиг. 56, в). Длительность каждого замыкания обычно



Фиг. 56. Графики перемещения подвижной плиты (s) и мощности (P) в процессе стыковой сварки оплавлением:

а — сварка непрерывным оплавлением; б — сварка с подогревом сопротивлением; в — сварка с подогревом оплавлением; 1 — общее укорочение деталей при оплавлении; 2 — укорочение при осадке; 3 — осадка под током; 4 — осадка без тока; 5 — общее укорочение деталей при сварке; 6 — общая длительность сварочного цикла; 7 — длительность включения тока; 8 — длительность оплавления; 9 — укорочение деталей при подогреве.

в) возможность нагрева деталей с меньшим укорочением при оплавлении, так как подогрев сопровождается, как правило, очень незначительным укорочением деталей (при сварке дорогостоящих сталей, например инструментальных, за счет уменьшенного припуска на оплавление достигается некоторая экономия ценного металла);

г) уменьшение внутреннего грата при сварке труб (за счет уменьшения количества оплаваемого металла).

Недостатки сварки с подогревом:

а) удлинение процесса и, как следствие, понижение производительности;

составляет от 0,3 до 1,5 сек. Число замыканий, зависящее от размеров свариваемых деталей, мощности машин и марки металла, лежит в пределах 3—20 (в исключительных случаях, например при сварке толстостенных труб сечением до 20 000 мм², число подогревательных импульсов может достигать 100 и более).

Сварка с подогревом по сравнению со сваркой непрерывным оплавлением имеет ряд преимуществ и одновременно существенные недостатки. К преимуществам относятся:

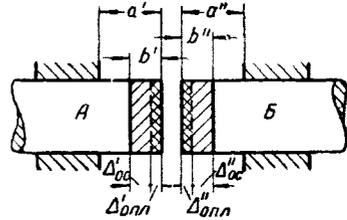
а) возможность сварки при относительно малой удельной мощности (облегчается сварка деталей большого сечения);

б) более широкая зона разогрева, в результате чего облегчается пластическая деформация при осадке и уменьшается скорость охлаждения после сварки (облегчается сварка трудно деформируемых или сильно закаляющихся сталей);

- б) усложнение автоматизации процесса;
 в) трудность контроля подогрева, неодинаковая степень которого понижает стабильность качества сварных соединений,
 г) относительно широкая зона перегретого металла у стыка, обладающая пониженными пластическими свойствами;
 д) неравномерность нагрева по сечению свариваемых деталей (особенно при сварке деталей с развитым периметром, например тонких листов и гонкостенных труб).

Сварка непрерывным плавлением находит основное применение в массовом производстве (автомобилестроение) для соединения деталей сечением до 1000—1500 мм², а также при сварке тонких листов большой ширины. Сварка с подогревом широко применяется в инструментальном производстве, для стыкования рельсов, для соединения труб и т. д. Неавтоматизированная сварка плавлением, как правило, проводится с подогревом.

Из изложенного следует, что режим сварки плавлением в общем случае определяется следующими параметрами: а) характером и длительностью подогрева; б) установочной длиной деталей; в) припуском на оплавление и его скоростью (и длительностью); г) средним значением сварочного тока; д) припуском на осадку (включая осадку под током и без тока); е) давлением осадки и ж) ее скоростью. На фиг. 57 приведена схема припусков при сварке плавлением (относительно небольшое укорочение деталей при подогреве обычно учитывается некоторым увеличением припуска на оплавление).



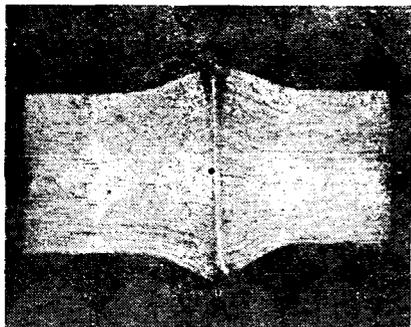
Фиг. 57. Установочные длины деталей А и Б и припуски при их сварке плавлением:

a — установочная длина; b — общий припуск на одну деталь; $\Delta_{оп.1}$ — припуск на оплавление одной детали; $\Delta_{ос}$ — припуск на осадку одной детали; $b' - b''$ — суммарный припуск при сварке.

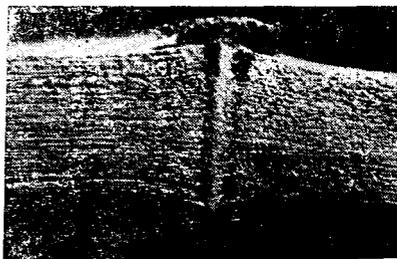
Стыковая сварка в зависимости от конфигурации свариваемых деталей и от конструкции машины может осуществляться без упоров или с упорами. В первом случае необходимое усилие осадки передается свариваемым деталям за счет трения, развиваемого между деталями и зажимающими их электродами. Усилие зажатия деталей при этом должно быть достаточным для того, чтобы предотвратить проскальзывание деталей в электродах в момент осадки. При сварке с упорами усилие осадки передается деталям через специальные жесткие упоры, гарантирующие от проскальзывания. В этом случае усилие зажатия относительно невелико; оно должно быть достаточным для получения надежного электрического контакта между свариваемой деталью и токоподводящим электродом зажима. Сварка с упорами более целесообразна, чем сварка без упоров, однако она не всегда возможна; например, при сварке длинных рельсов, листов или труб устройство жестких упоров практически исключено. При сварке без упоров усилие зажатия деталей является одним из важнейших параметров сварочного режима (см. § 4 гл. X).

§ 4. СВАРКА ОПЛАВЛЕНИЕМ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

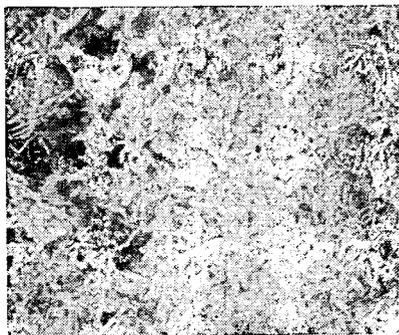
Сварка оплавлением малоуглеродистой стали дает соединения высокого качества. Необходимость в предварительном подогреве отсутствует за исключением сварки деталей большого сечения и в отдельных случаях — сварки труб, в которых желательно получение соединения с минимальным внутренним графом.



а)



б)



в)

Фиг. 58. Макроструктура (а—травление на волокно и б—глубокое травление) и микроструктура (в — $\times 125$) стыков малоуглеродистой стали, сваренных оплавлением; в стыке видно пониженное содержание углерода.

Макроструктура хорошо выполненного стыка характеризуется отсутствием раковин, пор, трещин, непроваров и неметаллических включений. Специальное травление выявляет искривление волокон (фиг. 58, а). Глубокое травление (фиг. 58, б) указывает на наличие вблизи стыка зоны с пониженной химической стойкостью. В самом стыке выявляется узкая белая полоска. Белая полоска представляет собой область относительно чистого металла с пониженным (по сравнению с окружающим основным металлом) содержанием углерода. Например, при сварке стали, содержащей $0,25\%$ С, содержание его в стыке (белой полоске) может понизиться до $0,1\%$. С этим связано некоторое понижение твердости в стыке по сравнению с прилегающими участками стали (см. § 2 гл. III). Причины понижения содержания углерода в стыке были рассмотрены в предыдущей главе. Типичная микроструктура сварного соединения ма-

лоуглеродистой стали показана на фиг. 58, в. Здесь феррито-перлитная структура часто имеет видманштеттово строение при относительно крупном размере зерна.

Структурные изменения при сварке горячекатанной и холоднокатанной малоуглеродистой стали были рассмотрены в § 2 гл. III. В околошовной зоне обычно наблюдается заметный рост зерна с характерной видманштеттовой структурой (см. фиг. 36, в). При широкой зоне разогрева видманштеттова структура обнаруживается и в стыке. При сварке малоуглеродистой стали с большим удельным давлением осадки (более 10—12 кг/мм²) пластическая деформация в зоне интенсивного нагрева деталей приводит к измельчению зерна, зерно вблизи стыка может оказаться даже мельче зерна основного металла. Высокое давление осадки вызывает значительное искривление волокон стали, которое иногда ведет к снижению пластичности сварного соединения. Применение очень высокого давления осадки при сварке малоуглеродистой стали целесообразно только при сварке непрерывным оплавлением.

При сварке малоуглеродистой стали стык, сваренный вполне качественно оплавлением, без последующей термической обработки обладает высокой прочностью при действии статической, ударной и циклической (регулярной повторно-переменной) нагрузок. Предел прочности сварного соединения со снятым гратом и полностью удаленным усилением, как правило, не ниже предела прочности основного металла. Ударная вязкость образцов с надрезом в плоскости стыка обычно лежит в пределах 6—12 кг.м/см². Относительно невысокая ударная вязкость сварного соединения по сравнению с соответствующими показателями для основного металла и значительное рассеяние результатов испытания сварных соединений на удар объясняются крупным зерном в зоне сварки. Ударная вязкость сварного соединения может быть существенно повышена термической обработкой сварного соединения (его нормализацией при температуре около 930° или низким отжигом при $T = 630\text{—}650^\circ$).

Предел усталости сварного соединения приближается к пределу усталости основного металла. Например, предел усталости круглого шлифованного образца из стали Ст. 3 со сварным стыком и без него оказался близким к 20 кг.м/мм². При качественно выполненной стыковой сварке усталостное разрушение происходит вне зоны сварки.

Ниже рассмотрены основные параметры режима сварки оплавлением малоуглеродистой стали.

Установочная длина деталей круглого или квадратного сечения обычно равняется $0,75d$, где d — диаметр круга или сторона квадрата.

Удельная мощность, потребляемая при сварке оплавлением, зависит от формы свариваемых деталей и от условий производства. Необходимая удельная мощность возрастает при переходе от сварки прямых деталей к сварке колец (вследствие потерь на шунтирование тока), а также при уменьшении толщины свариваемых деталей (из-за увеличения потерь тепла лучеиспусканием). Наименьшая удельная мощность требуется при индивидуальном и мелкосерийном производстве, когда сварка осуществляется медленно и ведется с предварительным

подогревом (например, при сварке толстостенных труб). Более высокая удельная мощность характерна для крупносерийного производства при неавтоматизированном процессе сварки с подогревом и, наконец, наибольшая удельная мощность применяется в массовом производстве при сварке непрерывным оплавлением с высокой производительностью. При определении удельной мощности можно пользоваться данными табл. 6.

Таблица 6

Удельная мощность при сварке оплавлением деталей из малоуглеродистой и низколегированной стали

Тип деталей и площадь их сечения	Удельная мощность в $\text{ккал}/\text{мм}^2$			
	Сварка оплавлением с подогревом		Сварка непрерывным оплавлением	
	Индивидуальное или мелко-серийное производство	Крупносерийное или массовое производство	Серийное производство	Массовое производство
Прямолинейные детали сечением до 2000 мм^2	0,05—0,08	0,12—0,16	0,15—0,25	0,25—0,40
Прямолинейные детали сечением более 2000 мм^2	0,03—0,05	0,05—0,12	—	—
Замкнутые детали сечением до 1500 мм^2	0,10—0,12	0,18—0,22	0,25—0,35	0,40—0,60
Замкнутые детали сечением более 1500 мм^2	0,08—0,16	0,10—0,18	—	—

Плотность тока при оплавлении обычно лежит в пределах $3\text{--}15 \text{ а}/\text{мм}^2$ (сварка с подогревом) или $10\text{--}50 \text{ а}/\text{мм}^2$ (сварка непрерывным оплавлением). Нижние пределы плотности тока соответствуют сварке деталей большого компактного сечения при низкой производительности процесса. Например, сварка непрерывным оплавлением обода автомобильного колеса осуществляется на автоматической машине при плотности тока $50 \text{ а}/\text{мм}^2$ с ритмом в 8 сек (что соответствует производительности в 450 сварок в час). Сварка с подогревом одного трубного стыка сечением около $20\,000 \text{ мм}^2$ на близкой по мощности машине занимает около 8 мин., а включая время на установку труб, до 30 мин.; при этом плотность тока лежит в пределах $2,0\text{--}3,0 \text{ а}/\text{мм}^2$.

Плотность тока при осадке, а также в момент замыкания деталей при их подогреве превышает (в $1,5\text{--}3,5$ раза) плотность тока в процессе устойчивого оплавления. Следует иметь в виду, что при определении силы тока с помощью обычного амперметра эта разница может оказаться и более значительной. Это объясняется тем, что обычный амперметр недостаточно хорошо реагирует на изменения тока при оплавлении, носящие характер нерегулярной пульсации, и показания прибора в момент оплавления ниже истинных значений тока. При осадке ток изменяется по синусоидальному закону и правильно определяется амперметром.

Плотность тока, необходимая при сварке оплавлением, как правило, в 1,5—2,5 раза меньше плотности тока, применяемой при сварке сопротивлением. Это подтверждает большую эффективность использования тепла при сварке оплавлением.

Длительность сварки. Суммарная затрата времени на одну сварочную операцию складывается из основного времени — длительности сварки (времени оплавления и осадки, а также подогрева, если он применяется) и вспомогательного времени, затрачиваемого на установку, закрепление и освобождение свариваемых деталей. Осадка производится быстро, и поэтому временем для ее осуществления можно пренебрегать. Длительность подогрева и оплавления (т. е. длительность сварки) при сварке малоуглеродистой стали зависит от сечения свариваемых деталей и от мощности используемого оборудования. В табл. 7. приведены ориентировочные данные, характеризующие длительность сварки оплавлением деталей из малоуглеродистой стали компактного сечения в условиях крупносерийного производства. Из этой таблицы, в частности, следует, что с увеличением сечения свариваемых деталей длительность сварки быстро растет, в особенности при сварке непрерывным оплавлением. В связи с этим эффективность сварки непрерывным оплавлением деталей

Таблица 7

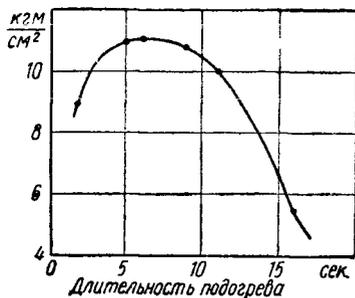
Длительность сварки оплавлением деталей из малоуглеродистой стали на машинах неавтоматического и автоматического действия

Диаметр круглой детали в мм	Площадь сечения квадрата или полосы в мм ²	Неавтоматическая сварка с подогревом		Автоматическая сварка непрерывным оплавлением		
		Длительность в секундах		Тип машины	Длительность оплавления	Тип машины ¹
		подогрева	оплавления			
5	20	—	2	АСИФ-25	—	—
10	80	2	3	АСИФ-25	—	—
15	180	3	4	АСИФ-25	6	МСМ-150
20	320	5	6	АСИФ-50	10	МСМ-150
30	700	8	6	АСИФ-75	20	МСМ-150
				МСР-100		
40	1200	25	8	МСР-100	40	МСГ-300
				МСМ-150		
				МСМ-150		
50	2000	30	8	МСГ-200	—	—
				МСГ-300		
75	4200	75	15	РСКМ-320У	—	—
90	6400	120	20	МСГ-300	—	—
				РСКМ-320У		

¹ Указан тип машины, обеспечивающий выполнение сварки с приведенной в таблице производительностью.

большого сечения значительно меньше, чем при сварке деталей малого сечения. Например, сварка непрерывным оплавлением стержней диаметром 20 мм (при соответствующей мощности оборудования) осуществляется в 2 раза скорее, чем сварка тех же деталей с подогревом, в то время как для стержней диаметром 30 мм это отношение уже снижается до 1,5.

Температура подогрева. При подогреве концы свариваемых деталей должны быть равномерно прогреты по всему сечению до температуры 700—900°. Высокая температура или большая длительность подогрева ведет к росту зерна в зоне стыка, понижающему ударную вязкость соединения (фиг. 59) и его угол загиба. При сварке деталей большого сечения (более 2000—3000 мм²) температура подогрева иногда повышается до 1000—1100°; что облегчает последующую деформацию при сварке.



Фиг. 59. Зависимость ударной вязкости сварного соединения от длительности подогрева (трубы диаметром 38 мм со стенкой 4,5 мм из стали с 0,20% С; в процессе сварки трубы оплавились на 5 мм со средней скоростью 2 мм/сек, Н. С. Кабанов).

При сварке с подогревом деталей сечением более 2000—3000 мм² скорость оплавления обычно не превышает 0,8—1,5 мм/сек. Скорость оплавления, характеризующая его интенсивность, оказывает заметное воздействие на качество сварного соединения. Как правило, с увеличением скорости оплавления уменьшается опасность окисления металла и повышаются пластические свойства соединения. Скорость оплавления деталей из малоуглеродистой стали в момент, предшествующий осадке, по возможности не должна быть ниже 2 мм/сек.

Припуск на оплавление должен быть достаточным для того, чтобы: а) при оплавлении произошел равномерный по всему торцу нагрев каждой детали; б) на торцах образовалась пленка расплавленного металла и в) детали прогрелись на требуемую длину и была обеспечена относительно легкая их пластическая деформация при осадке. Чем больше диаметр или толщина свариваемых деталей, тем медленнее происходит выравнивание температуры по сечению и, как следствие, тем больше должна быть длительность процесса и выше припуск на оплавление.

При сварке с подогревом суммарные припуски на оплавление и подогрев на 30—50% ниже, чем при сварке непрерывным оплавлением (в особенности при автоматизированном процессе). Это объясняется

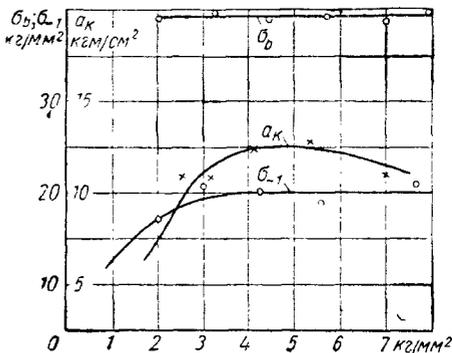
незначительным укорочением деталей при подогреве, с одной стороны, и, с другой стороны, необходимостью длительного оплавления при непрерывном процессе (для выравнивания температуры на торцах свариваемых деталей и их прогрева на необходимую длину). Припуски на оплавление и осадку деталей из малоуглеродистой стали при неавтоматической сварке оплавлением с подогревом и при автоматической без подогрева приведены в табл. 8.

Таблица 8

Припуски на оплавление и осадку стальных деталей в мм
(общие на обе свариваемые детали)

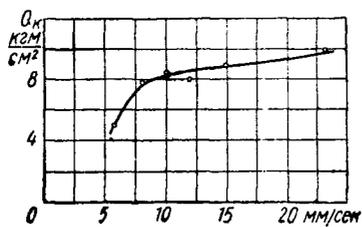
Диаметр детали в мм	Припуски при неавтоматическом процессе с подогревом					Припуски при автоматической сварке непрерывным оплавлением
	Общий припуск	Припуск на оплавление	Припуски на осадку			
			под током	без тока	общий	
5	5	3,5	0,5	1,0	1,5	—
10	8	6	0,5	1,5	2,0	—
15	8	6	0,5	2,0	2,5	13
20	10	7	0,75	2,25	3,0	17
25	13	9,5	1,0	2,5	3,5	21
30	16	12	1,0	3,0	4,0	25
40	20	14,5	1,5	4,0	5,5	40
50	22	15,5	1,6	4,9	6,5	—
75	25	19	1,8	5,2	7,0	—
90	32	24	2,0	6,0	8,0	—

Давление осадки оказывает очень существенное влияние на качество сварного соединения, в особенности на его прочность при действии динамических нагрузок (ударную вязкость и предел усталости), так как удельное давление определяет степень пластической деформации зоны стыка при осадке. Это иллюстрируется кривыми зависимости предела прочности σ_B , ударной вязкости a_K и предела усталости σ_{-1} от удельного давления осадки при сварке с подогревом стержней из малоуглеродистой стали (фиг. 60). Из приведенного графика, в частности, видно, что ударная вязкость соединения при чрезмерном увеличении удельного давления начинает понижаться вследствие значительного искривления волокон.

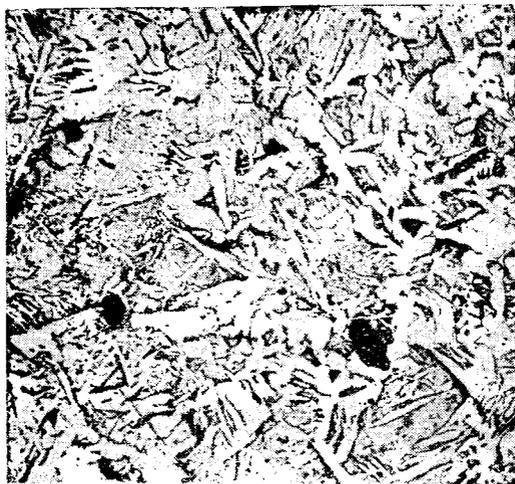


Фиг. 60. Зависимость предела прочности (σ_B), предела выносливости (σ_{-1}) и ударной вязкости (a_K) сварного соединения (малоуглеродистая сталь) от удельного давления осадки.

Необходимое удельное давление осадки зависит от условий нагрева деталей перед осадкой. При сварке деталей из малоуглеродистой стали



Фиг. 61. Зависимость ударной вязкости сварного соединения от скорости осадки (малоуглеродистая сталь, Н. С. Кабанов).



a)



b)

Фиг. 62. Дефекты сварного соединения (Н. С. Кабанов):

a — при малой скорости осадки ($\times 200$); б — при перегреве ($\times 1000$).

с подогревом удовлетворительные результаты обеспечиваются при удельном давлении, равном 3—5 кг/мм². При автоматической сварке той же стали непрерывным оплавлением с узкой зоной интенсивного нагрева удельное давление осадки должно быть повышено до 6—8 кг/мм².

Припуски на осадку компенсируют соответствующее укорочение деталей. Кроме того, как указывалось выше, во многих стыковых машинах степень осадки контролируется по величине укорочения, поэтому укорочение, определяемое припуском, является существенным параметром режима сварки. Значения припусков при сварке деталей компактного сечения приведены в табл. 8. Следует отметить, что величина осадки в большей степени определяет качество соединения, чем давление осадки.

Скорость осадки при сварке деталей из малоуглеродистых сталей не должна быть ниже 10—15 мм/сек. При малой скорости осадки заметно понижаются пластические свойства сварного соединения из-за окисления металла в начале осадки при незакрытом зазоре. На фиг. 61 показана зависимость ударной вязкости сварного соединения (малоуглеродистая сталь с содержанием около 0,2% С) от скорости осадки. Окислы в стыке при $v_{ос} = 4$ мм/сек видны на фотографии микроструктуры (фиг. 62, а).

§ 5. ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ ОПЛАВЛЕНИЕМ УГЛЕРОДИСТЫХ И ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Углеродистые и легированные стали, как правило, удовлетворительно свариваются оплавлением. Общей особенностью режима сварки этих сталей по сравнению со сваркой малоуглеродистой стали является применение повышенных давлений осадки.

По условиям сварки оплавлением все стали с повышенным содержанием углерода и легированные стали удобно разделить на четыре группы:

а) среднеуглеродистые стали с содержанием до 0,5% С и низколегированные стали с малым содержанием углерода (например, сталь 15ХМ, содержащая до 0,16% С, ~1% Сг и 0,5% Мо);

б) высокоуглеродистые стали (с содержанием более 0,5% С) и легированные стали с высоким содержанием углерода (например, сталь ШХ15, содержащая ~1% С и более 1% Сг);

в) высоколегированные конструкционные стали перлитного класса (например, сталь 16Х6М, содержащая до 0,16% С, около 6% Сг и до 0,5% Мо);

г) нержавеющие стали аустенитного класса (например, хромоникелевая сталь с содержанием около 18% Сг и 9% Ni).

Сварка оплавлением сталей первой группы может осуществляться с использованием режимов, принятых при сварке деталей аналогичного сечения и формы из малоуглеродистой стали. При этом целесообразно увеличение удельного давления осадки на 1—1,5 кг/мм² (до 4—6 кг/мм² при сварке с подогревом). В тех случаях, когда к сварному соединению предъявляются высокие требования пластичности, после

сварки может применяться термическая обработка. Обычно вполне приемлемые результаты дает низкий отжиг при температуре $\sim 650^\circ$. Например, образцы, вырезанные из сварного соединения труб (сталь 15ХМ), имели среднюю ударную вязкость $8,3 \text{ кгм/см}^2$ при пределе прочности 62 кг/мм^2 ; аналогичные образцы после низкого отжига имели ударную вязкость 14 кгм/см^2 и предел прочности 58 кг/мм^2 . Таким образом, в результате термической обработки несколько понизилась прочность сварного соединения (и его твердость) и заметно возросла ударная вязкость. Особенно благоприятное влияние на пластические свойства сварного соединения оказывает нормализация после сварки. При этом в самом стыке и прилегающей зоне термического влияния образуется мелкозернистая феррито-перлитная структура.

Сварка оплавлением высокоуглеродистых нелегированных и легированных сталей значительно труднее, чем сварка малоуглеродистых и низколегированных сталей. Это объясняется двумя особенностями высокоуглеродистых сталей: значительным интервалом температур между солидусом и ликвидусом (широкой температурной областью частичного расплавления стали) и большой восприимчивостью к закалке.

При широкой зоне частичного расплавления стали иногда наблюдается при сварке оплавлением ее разрыхление по обе стороны от линии стыка на расстоянии $1,5\text{--}2,5 \text{ мм}$ (фиг. 62, б). Появление рыхлости, по Е. А. Грейль, объясняется тем, что при нагреве стали в первую очередь расплавляются участки, обогащенные углеродом и легкоплавкими примесями. Вследствие низкой температуры солидуса (например, сталь, содержащая 1% С, начинает плавиться около 1360°) участки частично расплавленного металла проникают глубоко в тело свариваемых деталей. Во время осадки расплавленный металл в непосредственной близости к плоскости стыка вытесняется, и в стыке остается сравнительно узкая полоска очень чистого тугоплавкого металла с пониженным содержанием углерода и вредных примесей (температура солидуса малоуглеродистой стали выше 1450°). Однако удаление при осадке расплавленного металла из узких промежутков между нерасплавленными зернами затруднено—здесь расплавленный металл при осадке задерживается, и в процессе последующего охлаждения и усадки в нем могут образоваться усадочные раковины, большое количество которых создает впечатление сплошной рыхлости.

Борьба с рыхлостью возможна путем уменьшения длительности нагрева (уменьшения ширины зоны частичного расплавления) или увеличения удельного давления осадки. Сварка рассматриваемых сталей с малой шириной интенсивно нагреваемой зоны ведет к резкой закалке в стыке и рядом с ним. В результате этого в стыке могут появиться трещины. Борьба с трещинами осуществляется замедленным охлаждением деталей после сварки (помещением деталей в подогретую, теплоизолирующую среду — песок, слюду, или пропусканием через сваренные детали дополнительного импульса тока по окончании осадки). Сочетание кратковременного нагрева при сварке („жесткого“ режима сварки) с последующей термической обработкой обеспечивает наилучшие результаты.

Повышенное удельное давление осадки (до 6—8 кг/мм² при неавтоматизированной сварке с подогревом и до 7—10 кг/мм² при сварке непрерывным оплавлением) способствует более полному удалению из стыка и прилегающих зон частично расплавленного металла.

При сварке оплавлением высоколегированных сталей перлитного класса приходится прежде всего учитывать их склонность к закалке и сопротивляемость пластическим деформациям при высоких температурах. Сварка этих сталей осуществляется относительно легче, чем высокоуглеродистых сталей. После сварки эти стали, как правило, термически обрабатываются (нормализуются или отжигаются). При сварке иногда наблюдаются трещины. Способы борьбы с трещинами такие же, как при сварке оплавлением высокоуглеродистых сталей.

Сварка сталей четвертой группы (аустенитных сталей) вполне возможна. В связи с относительно высоким удельным электрическим сопротивлением аустенитных сталей удельная мощность, необходимая при сварке сталей этого класса, несколько ниже, чем при сварке в одинаковых условиях стали перлитного класса (например, малоуглеродистой стали). Вследствие значительной жаропрочности аустенитных сталей удельные давления осадки существенно повышаются. При сварке деталей компактного сечения и толстостенных труб давление осадки не должно быть ниже 12—14 кг/мм²; при сварке листов удельное давление осадки должно быть повышено до 20—25 кг/мм². Чем больше ширина свариваемых листов, тем выше необходимое удельное давление.

При оплавлении аустенитных сталей содержание кислорода в зоне стыка значительно выше, чем при сварке обычных углеродистых сталей. В связи с этим при сварке аустенитных сталей особенно необходимы большие скорости оплавления и осадки. Например, увеличение скорости оплавления с 1 до 3 мм/сек привело к повышению ударной вязкости сварного образца с 6 до 15 кгм/см². Увеличение скорости осадки с 12 до 30 мм/сек вызвало увеличение ударной вязкости сварного образца с 10 до 18 кгм/см². Еще заметнее сказывается изменение скоростей на деформационной способности сварного соединения (на его угле загиба). При сварке оплавлением деталей из аустенитной стали сечением 500 мм² скорость оплавления не должна быть ниже 3 мм/сек; минимальная скорость осадки, при которой могут быть обеспечены удовлетворительные пластические свойства сварного соединения, близка к 30 мм/сек.

Припуски на оплавление и осадку при сварке сталей аустенитного класса близки к соответствующим припускам, применяемым при сварке углеродистых сталей. Установочная длина деталей из аустенитных сталей может быть несколько уменьшена (примерно на 25⁰/₁₀) по сравнению с установочной длиной деталей одинакового размера и формы из малоуглеродистой стали.

Не представляет особых затруднений сварка деталей из разнородных сталей, например, детали из аустенитной стали с деталью из перлитной стали. В этом случае основное значение имеет одинаковый нагрев обеих деталей. Это достигается их неодинаковой установочной длиной. При сварке аустенитной стали с малоуглеродистой их установочные длины

должны находиться в отношении 1:2,5 (большая установочная длина соответствует детали из малоуглеродистой стали с меньшим электрическим сопротивлением). Приведенное выше отношение установочных длин может несколько изменяться в зависимости от размера деталей и химического состава свариваемых сталей. Оно подлежит уточнению при опытно-освоении новой технологической операции.

§ 6. МЕТОДЫ ВЫБОРА РЕЖИМА СТЫКОВОЙ СВАРКИ СТАЛИ

Целесообразный режим стыковой сварки определяется площадью сечения свариваемых деталей, их конфигурацией, химическим составом стали и характером производства (индивидуальное, серийное, массовое). На практике встречаются два различных случая: в первом производство оснащается оборудованием вновь, и технолог, разрабатывающий технологический процесс сварки и устанавливающий ее режим, выбирает сварочную машину, характеристики которой наиболее полно отвечают требованиям производства; во втором случае перед технологом-сварщиком стоит задача наиболее рационального использования имеющегося оборудования.

В первом случае работа технолога начинается с выбора принципиальной схемы технологического процесса (сварка сопротивлением, сварка непрерывным оплавлением, сварка оплавлением с подогревом). Затем, пользуясь данными табл. 6, можно определить необходимую мощность сварочной машины. Далее устанавливаются проектные параметры технологического режима сварки. Для этого могут быть использованы приведенные выше данные по установочным длинам деталей, припускам, усилию и скорости осадки, длительности процесса и т. д.

В случае использования имеющегося на заводе оборудования возможность сварки заданных деталей проверяется по паспорту машины или ее технической характеристике (см. гл. X).

При сварке ответственных соединений, в особенности в крупносерийном и массовом производстве, разработанный технологом режим сварки подлежит опытной проверке и уточнению. С этой целью обычно сваривается опытная партия изделий и производится испытание сварных соединений (см. § 8). В случае обнаружения дефектов режим корректируется в зависимости от характера этих дефектов. Анализ возможных причин образования часто встречающихся при стыковой сварке дефектов и пути их устранения рассмотрены в § 8 настоящей главы.

Пример расчета параметров режима стыковой сварки

Требуется определить основные параметры режима стыковой сварки деталей круглого сечения диаметром 32 мм из малоуглеродистой стали. Производство — массовое.

В соответствии с данными § 3 наиболее целесообразна для данного случая сварка непрерывным оплавлением. В массовом производстве при сварке прямолинейных деталей сечением до 2000 мм² (табл. 6) удельная мощность равна 0,25—0,40 ква/мм². Сечение деталей равно 800 мм². При удельной мощности 0,25 ква/мм² потребуется машина мощностью 0,25·800 = 200 ква. Длительность автоматической сварки непрерывным оплавлением деталей диаметром 30 мм (табл. 7) составляет 20 сек. Эта же длительность принимается для деталей диаметром 32 мм.

Установочная длина равна $0,75d = 0,75 \cdot 32 = 24$ мм (см. § 4). По данным табл. 8, общий припуск на оплавление и осадку при сварке непрерывным оплавлением деталей диаметром 30 мм равен 26 мм, а при сварке деталей диаметром 40 мм — 40 мм. Для деталей диаметром 32 мм принимаем общий припуск 28 мм. При этом припуск на осадку составит 5 мм (1,5 мм под током).

При сварке непрерывным оплавлением деталей из малоуглеродистой стали удельное давление осадки (см. § 4) в среднем равно 7 кг/мм^2 . Необходимое усилие осадки составит $800 \cdot 7 = 5600 \text{ кг}$. При сварке с упорами усилие зажатия не должно быть меньше $0,5 \cdot 5600 = 2800 \text{ кг}$. Таким образом, для выполнения заданной сварочной операции требуется автоматическая стыковая машина мощностью не менее 200 *квa*, развивающая усилие осадки не менее 5000 кг, снабженная упорными приспособлениями и зажимами, обеспечивающими усилие не менее 2800 кг. Если считать, что в условиях массового производства достаточно 5 сек. на установку и зажатие деталей в машине и на освобождение их после сварки, то общая длительность одной сварочной операции составит $20 + 5 = 25$ сек. При этом часовая производительность достигнет $\frac{3600}{25} = 144$ шт.

Если задана более высокая производительность, то за счет повышения удельной мощности должна быть повышена общая мощность сварочной машины. При этом соответственно должно быть увеличено и удельное давление осадки.

§ 7. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ СТЫКОВОЙ СВАРКИ КОЛЕС, РЕЛЬСОВ, ТРУБ, ТОНКИХ ЛИСТОВ И ЗВЕНЬЕВ ЦЕПЕЙ

Сварка ободов колес широко распространена в автомобильной промышленности, где для этой цели применяются мощные автоматические стыковые машины (мощностью до 750 *квa*) и процесс ведется непрерывным оплавлением с очень высокой производительностью. Заготовка обычно вальцуется с прямыми концами (см. фиг. 45, а). Удаление грата и высаженного металла с внешней и внутренней сторон обода может производиться наждачным кругом или на специальном станке, оснащенном двумя вращающимися головками, в которых укреплены резцы, а также на прессе. Далее обод калибруется в специальных приспособлениях; сначала обод равномерно растягивается в расширителе (экспан-дере), а затем обжимается до заданного размера. При этом, помимо калировки обода, достигается его упрочнение (благодаря наклепу) и одновременно осуществляется испытание сварного соединения. Обод с дефектной сваркой, как правило, разрушается в расширителе.

В практике известны случаи сварки оплавлением с подогревом колец сечением до $10\,000 \text{ мм}^2$ при диаметре до 1500 мм и мощности стыковой машины, достигающей 1000 *квa*.

Сварка рельсовых стыков имеет большое народнохозяйственное значение. Она применяется для создания длинных рельсовых плетей (до 25 м и выше), что способствует значительному улучшению эксплуатационных показателей рельсового пути на железнодорожном транспорте. Отсутствие толчков подвижного состава на сварных стыках уменьшает как износ пути, так и подвижного состава.

Контактная стыковая сварка — наиболее распространенный в настоящее время метод сварки рельсовых стыков. Нормальный железнодорожный рельс имеет сечение свыше 5000 мм^2 и изготавливается из стали с содержанием более $0,5\%$ С. В связи с этим сварка рельсов производится оплавлением с подогревом. Для этой цели в СССР применяются машины автоматического действия мощностью 200—320 *квa*.

Сварка рельсовых стыков производится в стационарных или передвижных мастерских. Рельсы поступают на сварку с перпендикулярно обрезанными торцами. Поверхность рельса на участке, зажимаемом в электродах, перед сваркой очищается. После автоматической сварки с подогревом горячий грат с нижней стороны подошвы рельса обрубается пневматическим зубилом. Затем сваренный рельс перемещается по продольному конвейеру, после чего зубилом срубается остальная грат. Далее стык шлифуется карборундовым кругом для получения ровной поверхности. Наконец, сваренный рельс обрезается на заданную длину, и сверлятся отверстия для болтовых соединений.

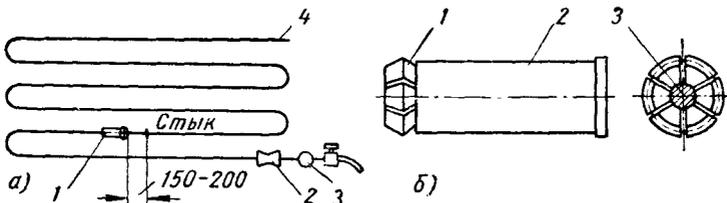
Режим сварки рельсового стыка характеризуется следующими параметрами: установочная длина 55—60 мм, припуск на подогрев и оплавление (суммарный на оба рельса) 20 мм, припуск на осадку 7—9 мм, удельное давление осадки — не менее 3 кг/мм², длительность сварки 100—150 сек., скорость осадки ~ 15 мм/сек. Приведенный режим сварки обеспечивает относительно широкую зону интенсивного нагрева, в результате чего стык после сварки охлаждается с умеренной скоростью — твердость в околостыковой зоне при этом не превышает, как правило, 250—280 единиц по Бринелю (иногда в зоне стыка встречаются также участки, обогащенные углеродом, твердость которых может достигать 400 Н_B). Сваренные по приведенному режиму стыки обычно не подвергаются последующей термической обработке. При этом обеспечиваются вполне удовлетворительная статическая прочность (разрушающая нагрузка при изгибе сварного рельса, уложенного на две опоры, составляет 80—90% соответствующей разрушающей нагрузки целого рельса) и очень высокий предел усталости при работе на регулярную повторно-переменную нагрузку (предел усталости сварного стыка достигает 80—85% предела усталости целого рельса). Образцы, вырезанные из сварного стыка, обладают сравнительно низкой ударной вязкостью (1—2 кгм/см²). Дальнейшее улучшение качества сварных рельсовых стыков может быть достигнуто переходом на более „жесткий“ режим сварки (уменьшаются размеры зерна и сужается зона частичного расплавления стали, в которой часто наблюдаются рыхлости и другие дефекты) с обязательным применением последующей термической обработки. Изменение технологии требует перехода к более мощным стыковым машинам и применения термических печей.

Производительность одной рельсосварочной установки достигает 8—12 стыков в час и выше. Качество рельсовых стыков обычно контролируется в производственных условиях их внешним осмотром и систематическим испытанием на статический изгиб специально свариваемых контрольных образцов. При этом определяются величина ломающего груза и стрела прогиба рельса в момент его разрушения (прогиб характеризует пластические свойства рельсового стыка). Выходящие на поверхность рельса трещины могут быть также обнаружены методами магнитной дефектоскопии.

Сварка труб широко применяется в котлостроении и при изготовлении различной химической аппаратуры. Ее особенностью в этих случаях является необходимость обеспечения в месте сварки свободного

внутреннего диаметра (как правило, проверяемого после сварки специальным контрольным шариком). Как уже указывалось, при сварке оплавлением внутри трубы образуется более или менее значительное утолщение из высаженного металла и грата. Это утолщение при сварке толстостенной трубы с малым внутренним диаметром может почти полностью закрыть ее внутреннее отверстие. Удаление грата и высаженного металла в производственных условиях выполняется одним из следующих способов: а) дорном, б) специальным снарядом, в) сжатым воздухом и г) шариком.

Дорн представляет собой цилиндрический режущий инструмент, наружный диаметр которого несколько меньше (на 2—3 мм) номинального внутреннего диаметра трубы. Горячий высаженный металл и грат



Фиг. 63. Удаление внутреннего грата и высаженного металла в стыках змеевика:

а — схема установки; б — снаряд (С. А. Нарский).

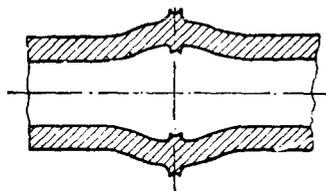
немедленно по окончании осадки легко срубаются ударами кувалды по дорну. Дорн применим для удаления высаженного металла и грата на прямолинейных участках труб.

При сварке гнутых труб (змеевиков) иногда применяются специальные снаряды по схеме, изображенной на фиг. 63, а. Снаряд 1 перед сваркой закладывается в одну из труб на расстоянии 150—200 мм от стыка. Другой конец этой трубы соединяется вентилем с магистралью сжатого воздуха. В свободный конец трубы предварительно закладываются стальной боек 2 и резиновый шар 3. Немедленно по окончании осадки очередного стыка в трубу подается сжатый воздух. Под его давлением резиновый шар и вместе с ним боек устремляются вдоль трубы, развивая большую скорость. Боек ударяет по снаряду, который прорезает в высаженном металле отверстие заданного диаметра. Снаряд, боек и резиновый шар улавливаются у свободного конца 4 трубы. В снаряде (фиг. 63, б) с шестью ножами 1, сидящими в корпусе 2, имеется резиновый сердечник 3, облегчающий прохождение снаряда через гибы трубы. Тем не менее в производственных условиях снаряды часто застревают в трубе. Для удаления застрявшего снаряда приходится вырезать соответствующий участок трубы и затем вновь его заварить. Это связано с потерей времени и с нарушением нормального ритма производства.

Значительно проще и дешевле продувка сваренного стыка струей сжатого воздуха. С этой целью один конец свариваемой трубы присоединяется шлангом большого сечения к магистрали сжатого воздуха давлением не ниже 6—8 атм. По окончании осадки сварщик открывает

вентилем доступ сжатого воздуха в трубу. Сильная струя воздуха частично выдувает высаженный металл и грат, а частично его сглаживает, увеличивая внутреннее проходное отверстие в трубе. После продувки внутренний диаметр контролируется пропусканьем в трубу шарика требуемого диаметра. При продувке существует опасность местного уменьшения толщины стенки трубы около стыка. Условия продувки должны строго контролироваться.

Иногда при продувке используется пробивной шарик. Этот шарик должен иметь диаметр, несколько больший диаметра контрольного шарика. При несоблюдении этого требования контрольный шарик может не пройти в стыке, так как пробивной шарик прогоняется через горячий стык, внутренний диаметр которого заметно уменьшается при остывании.



Фиг. 64. Разрез трубы в месте стыка после дополнительной осадки.

В последнее время предложен (Г. В. Нездвецким, И. Д. Давыденко) способ увеличения внутреннего диаметра трубы в месте стыка его повторной осадкой. С этой целью немедленно после сварки зажимы машины раздвигаются на расстояние 50—60 мм (при сварке труб диаметром 40—50 мм) и в них вновь зажимается сваренная труба. После этого зона стыка повторно нагревается отдельными импульсами тока и производится повторная осадка стыка. При этом увеличиваются как наружный, так и внутренний диаметры трубы (фиг. 64). Последнее приводит к желательному увеличению проходного отверстия.

С целью уменьшения внутреннего грата при сварке труб применяется подогрев, позволяющий заметно (почти на 50%) снизить припуски на оплавление.

Трубные соединения часто работают в очень тяжелых эксплуатационных условиях, находясь под одновременным воздействием высокого давления, высокой температуры и агрессивной среды (среды, активно разрушающей металл). Иногда незначительные, трудно уловимые дефекты в стыках (например, перегрев стали в околостыковой зоне) приводят к преждевременному разрушению сварного соединения, следствием которого может быть тяжелая авария дорогостоящей установки. В связи с этим технологический процесс сварки ответственных трубных соединений должен особенно тщательно регулироваться и контролироваться. Это очень важно еще и потому, что до настоящего времени не разработаны надежные методы контроля качества сварных трубных стыков без их разрушения. Одним из важнейших мероприятий по улучшению качества сварки труб и по повышению устойчивости сварочного процесса является его автоматизация. Для получения качественных результатов сварки необходима тщательная подготовка труб перед сваркой: торцы должны быть перпендикулярны оси труб. Концы труб, зажимаемые в электродах машины, должны очищаться до металлического блеска; вблизи торца внутренняя сторона трубы должна очищаться от смазки и грязи,

Помимо тщательного контроля технологического процесса сварки, готовые стыки подвергаются гидравлическому испытанию и внешнему осмотру. Иногда поверхность стыка шлифуется и протравливается для выявления выходящих на наружную поверхность трещин или непровара. Дефектные стыки вырезаются и вновь завариваются электродуговой или газовой сваркой.

Стыки труб из легированных сталей после сварки обычно подвергаются термической обработке, характер которой зависит от химического состава стали и от назначения труб. Трубы из низколегированной стали (например, хромомолибденовой) проходят после сварки низкий отжиг при температуре $660-680^{\circ}$ или нормализацию. Трубы из высоколегированной перлитной стали иногда после отжига подвергаются закалке и отпуску. Такая термическая обработка обеспечивает высокое сопротивление стали ползучести.

Сварка тонких листов очень эффективно применяется в металлургическом производстве для увеличения длины рулонов, подвергающихся непрерывной переработке в прокатных цехах (например, при травлении, полировании, холодном прокате и т. д.). При этом свариваются ленты и листы шириной от 300 до 1500 мм и выше при толщине от 1,5 до нескольких миллиметров. Свариваются листы как из углеродистых, так и из легированных сталей перлитного и аустенитного классов.

Сварка встык тонких листов применяется также в автомобильной промышленности. В одних случаях она используется для получения из двух листов нормального размера одного большого, необходимого при штамповке крупных деталей кузова автомобиля. Часто в практике современного автомобилестроения крупные штамповки сложной формы разбиваются на несколько мелких деталей, не требующих при изготовлении тяжелых и дорогих штампов. Полученные детали свариваются встык на машинах, оснащенных специальными электродами, профиль которых соответствует форме соединяемых деталей.

Стыковая сварка тонких листов большой ширины должна производиться оплавлением без подогрева, так как при этом способе сварки обеспечивается наиболее равномерный нагрев свариваемых кромок. Равномерность нагрева особенно важна при сварке тонких листов. Удельная мощность при сварке оплавлением тонких листов составляет около $0,2-0,25 \text{ ква/мм}^2$.

При сварке тонких листов создаются благоприятные условия для окисления торцов, резко снижающего качество сварного соединения. Это окисление особенно опасно при сварке аустенитных сталей. В связи с этим при сварке тонких листов необходимо применение высоких скоростей оплавления и осадки. Скорость оплавления непосредственно перед осадкой должна быть не ниже $2,5-3 \text{ мм/сек}$. Скорость осадки не должна быть ниже 30 мм/сек .

При сварке листов во избежание деформации кромок в момент осадки применяется малая установочная длина (например, при сварке листов толщиной 3 мм каждый лист выпускается из зажима не более чем на 12 мм; после оплавления и осадки расстояние от стыка до

электрода уменьшается до 3—4 мм). В результате этого температура очень быстро снижается от оплаваемых кромок к медным электродам и ширина зоны интенсивного нагрева листов мала. Это затрудняет деформирование стали при осадке — удельное давление осадки должно быть повышено (по сравнению с давлением, применяемым при сварке деталей компактного сечения из той же стали). При сварке листов из стали аустенитного класса это давление достигает 25 кг/мм^2 ; при сварке малоуглеродистой стали оно не должно быть ниже $8—12 \text{ кг/мм}^2$.

Важнейшим условием качественной сварки тонких листов является отсутствие смещения свариваемых кромок. Это достигается, с одной стороны, соответствующей конструкцией сварочной машины и прежде всего ее зажимных устройств (требуются значительная жесткость зажимов и всей машины в целом, возможность точной регулировки электродов и большая их стойкость) и, с другой стороны, тщательной подготовкой листов перед сваркой (правильной обрезкой листов без заусенцев и сколов, правкой листов и т. д.).

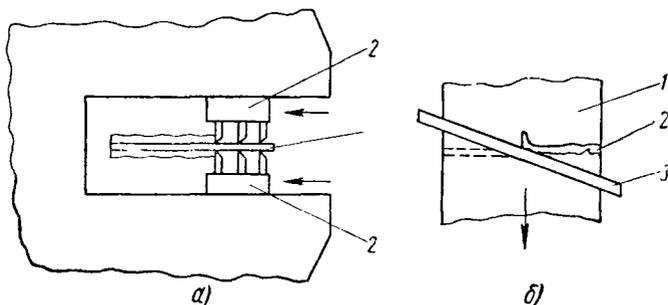
Во избежание совершенно недопустимого проскальзывания свариваемых листов в электродах при осадке листы должны надежно зажиматься. Величина усилия зажатия зависит от коэффициента трения между свариваемым листом и электродами. Этот коэффициент выше при зажатии мягкой малоуглеродистой стали и ниже при сварке листов нержавеющей стали; он существенно зависит также от материала электродов — с увеличением их твердости, как правило, коэффициент трения падает. Тем не менее, стойкость электродов настолько важна при сварке тонких листов (при износе электродов облегчается смещение кромок свариваемых листов, а смена или регулировка электродов снижает производительность процесса), что приходится применять электроды высокой твердости, несмотря на необходимость увеличения зажимных усилий сварочной машины. При сварке листов из нержавеющей стали усилие зажатия листа должно по крайней мере в 3,75 раза превышать необходимое при сварке усилие осадки. Это отношение при сварке листов из малоуглеродистой стали может быть понижено до 2,75, а при сварке легированных сталей перлитного класса и углеродистых сталей с повышенным содержанием С — до 3,25.

Образуемое при сварке утолщение удаляется на специальных станках-гратоснимателях. Существует несколько типов таких станков. В одном из них сваренный лист 1 закрепляется в месте стыка специальными прижимами между многолезцовыми головками 2, перемещающимися вдоль стыка (фиг. 65, а). Последовательно расположенные резцы постепенно срезают утолщение по всей длине стыка. Недостаток этого способа — необходимость остановки свариваемых листов в гратоснимателе, что в случае непрерывного процесса вызывает нежелательную его задержку. Во втором типе гратоснимателя сваренная лента не останавливается, непрерывно перемещаясь между двумя косо установленными ножами 3 (фиг. 65, б), постепенно срезающими утолщение при движении ленты.

Сварка звеньев цепей. Сварка встык звеньев цепей осуществляется в настоящее время как сопротивлением (более

старый способ), так и оплавлением. Первый способ применяется для цепей диаметром до 20 мм, второй может применяться для сварки цепей любого калибра. Сварка звеньев сопротивлением выполняется с одним стыком на высокопроизводительных автоматах, обеспечивающих отрезку заготовок требуемой длины, их гибку и сварку стыка (в час сваривается до 200 звеньев).

При сварке оплавлением обеспечивается более высокое качество сварных соединений, в связи с этим цепи большого калибра, как правило, свариваются этим способом. Сварка производится из двух штампованных (обычно вгорячую) половин, имеющих необходимые для сварки



Фиг. 65. Способы удаления графа после сварки листов:

а — при неподвижном листе и перемещающихся многолезвчатых головках; *б* — при неподвижном ноже и перемещающемся листе.

припуски. Заготовки очищаются от окалины и свариваются, после чего срезается утолщение в специальных штампах на прессе.

Сварка оплавлением звеньев цепей может производиться на машинах универсального типа соответствующей мощности, оборудованных необходимыми для этой цели электродами. Однако высокая производительность процесса наряду с однородным качеством получаемых стыков обеспечивается при использовании специальных машин автоматического действия, осуществляющих сварку непрерывным оплавлением. В этом случае возможна сварка 50—75 звеньев в час при цепях диаметром 25—40 мм. Для более легкого возбуждения и поддержания процесса оплавления торцы полузвеньев цепей большого калибра иногда перед сваркой высаживаются для образования на них небольших выступов.

§ 8. ДЕФЕКТЫ СТЫКОВОЙ СВАРКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СТЫКОВ

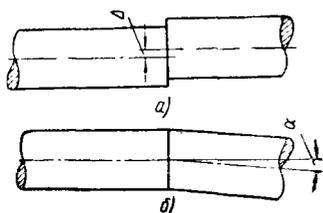
Все дефекты, встречающиеся при стыковой сварке конструкционных сталей, можно разделить на три группы:

а) неправильность геометрической формы сварного узла; б) дефекты макроструктуры и в) дефекты микроструктуры.

К дефектам первой группы относится смещение осей (фиг. 66, *а*) и перекос свариваемых деталей (фиг. 66, *б*). Значительное смещение

осей вызывает понижение прочности сварного узла. Смещение и перекос деталей затрудняют механическую обработку сварного узла.

Смещение осей и перекосы вызываются неточной заготовкой деталей и неправильной их установкой в электродах машины, износом электродов



Фиг. 66. Смещение (а) и перекос деталей (б) при стыковой сварке.

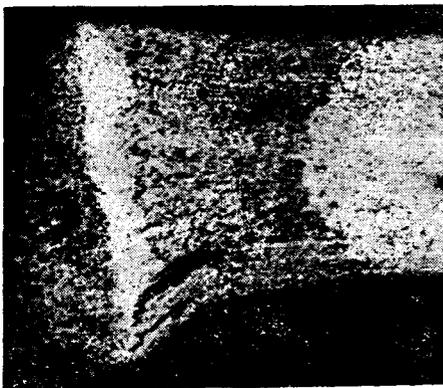
цепочки крупных неметаллических включений. Непровар является одним из самых опасных дефектов стыковой сварки. Он резко снижает пластичность сварного соединения (угло

дов или недостаточно жестким их креплением, значительными зазорами в направляющих машины и малой жесткостью станины.

Важнейшие дефекты второй группы: непровар, расслоение, трещины, рыхлость. Полный или частичный непровар характеризуется отсутствием кристаллического излома при разрушении сварного стыка (по всему сечению или его части). На шлифе, вырезанном из непроваренного стыка, обычно невооруженным глазом обнаруживаются сплошные пленки окислов (фиг. 67, а) или



а)



б)



в)

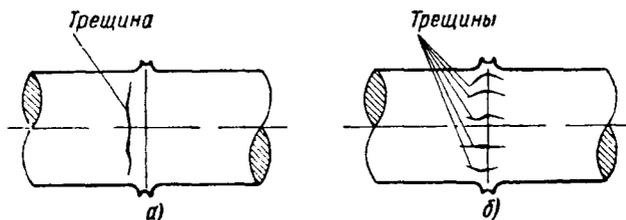
Фиг. 67. Макродефекты стыков, сваренных оплавлением:

а — фотография шлифа на участке стыка со значительным непроваром; б — местный непровар ($\times 100$; Н. С. Кабанов); в — расслоение стали вдоль волокон при осадке. (С. Е. Синадский и И. М. Ваганов.)

Значительный непровар может также понизить статическую прочность стыка. Основные причины непровара: низкая темпе-

ратура деталей перед осадкой [затрудняются пластическая деформация в зоне стыка и удаление из него окисленного металла; при малой величине осадки кратеры на торцах деталей не закрываются (фиг. 67, б)]; недостаточное давление осадки (не закрываются кратеры на торцах); начало осадки при выключенном токе (остывание и окисление металла на торцах).

Расслоение стали (фиг. 67, в) наблюдается при значительной осадке стали с явно выраженным волокнистым строением в тех случаях, когда сталь сильно загрязнена, в особенности легкоплавкими сернистыми включениями. Расслоения, выходя на поверхность сваренной детали, образуют надрывы и трещины.



Фиг. 68. Схема расположения трещин в зоне сварного стыка:
а — поперечная трещина; б — продольные трещины.

Трещины бывают кольцевые (поперечные) и продольные. Поперечные трещины (фиг. 68, а) при стыковой сварке — редкое явление. Они могут вызываться внутренними напряжениями в результате закалки при быстром охлаждении зоны стыка. Продольные трещины (фиг. 68, б) возникают при чрезмерной высадке перегретой стали.

Рыхлость в околостыковой зоне возникает в результате перегрева стали. Ее причины были подробно рассмотрены выше (см. также фиг. 62).

К дефектам микроструктуры относятся крупное зерно, загрязнение стыка неметаллическими включениями, микрогребни и т. д. Дефекты этой группы могут существенно понизить пластичность сварного соединения, практически не оказывая влияния на его прочность при статическом растяжении. Крупное зерно вызывается перегревом стали в околостыковой зоне (см. фиг. 62, б). Загрязнение стыка неметаллическими включениями обычно связано с окислением стали в процессе оплавления или в начале осадки. Окисление при оплавлении может быть следствием нарушения непрерывности процесса (нестабильное оплавление). Загрязнение стыка неметаллическими включениями иногда является следствием большого количества таких включений в основном металле.

Контроль качества стыковых соединений осуществляется внешним осмотром и обмером сваренных деталей, механическими испытаниями всех или части сваренных деталей, испытанием отдельных контрольных образцов, металлографическим исследованием макро- и микроструктуры сварных стыков.

Обмером устанавливается отсутствие недопустимого смещения и перекоса осей сваренных деталей. Внешний осмотр устанавливает отсутствие наружных трещин и надрывов. При наличии продольных надрывов стык не обязательно бракуется. Металл в месте надрыва может быть срублен зубилом и зашлифован до полного удаления следов надрыва. Это устанавливается последующим травлением кислотой. Если при этом в стыке сохраняется исходное сечение деталей, то обеспечивается необходимая его прочность. Поперечные надрывы и трещины, как правило, являются браковочным признаком.

Наиболее опасный при стыковой сварке дефект — непровар характеризуется очень малым размером в направлении, перпендикулярном к плоскости стыка (обычно толщина пленок окислов в стыке не превышает нескольких десятков микрон). Это крайне затрудняет обнаружение непровара методами физической дефектоскопии. Рентгеновское просвечивание и просвечивание γ -лучами радия, а также методы магнитной дефектоскопии, как правило, не обнаруживают непровара в соединениях, выполненных стыковой сваркой. Отсутствие в настоящее время надежных методов контроля качества сварных стыков (степени провара) без их разрушения заставляет тщательно контролировать технологический процесс сварки, который должен предварительно проверяться сваркой контрольных образцов. Эти образцы обычно испытываются на загиб или удар. Исследуется также структура стали в зоне стыка. При положительных результатах испытаний и удовлетворительной структуре начинается сварка промышленных деталей. Качество сварки периодически контролируется путем повторных испытаний. Для повышения однородности качества соединений рекомендуется автоматизация сварки.

При сварке труб, помимо перечисленных способов контроля качества сварки, применяется еще гидравлическое испытание.

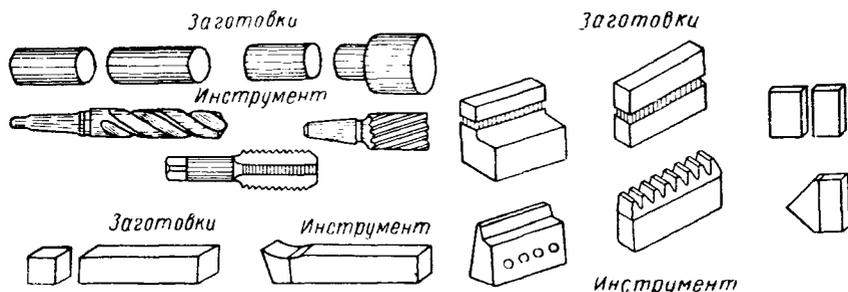
§ 9. ПРИМЕНЕНИЕ СТЫКОВОЙ СВАРКИ В ИНСТРУМЕНТАЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Контактная сварка и, в первую очередь, стыковая сварка очень широко применяются для изготовления режущего инструмента (сверл, разверток, резцов и т. д.). Рабочая часть инструмента делается из быстрорежущей стали (или ее заменителей), а хвостовая часть или державка — из углеродистой стали. Применение сварки обеспечивает экономию дорогостоящей высоколегированной инструментальной стали.

В настоящее время получил распространение составной инструмент двух типов: сварной и наварной. В первом случае обычно применяется стыковая сварка оплавлением с подогревом (сварка непрерывным оплавлением нецелесообразна, так как при малой ширине зоны разогрева и, следовательно, большой скорости охлаждения в инструментальной стали часто образуются трещины). Типовые заготовки и получаемый из них после соответствующей механической обработки сварной инструмент показаны на фиг. 69.

Несколько типов наварного инструмента показано на фиг. 70. В этом случае пластинки из инструментальной стали „навариваются“

на боковую поверхность державок. Эта конструкция применяется для резцов, вставных зубьев фрез и т. п. Наварка пластинок может производиться оплавлением, что не особенно рационально, так как при небольшой толщине пластинки потери металла на оплавление и осадку составляют значительную часть исходного веса пластинки. Удо-



Фиг. 69. Типы сварного инструмента и заготовок.
(Н. А. Бухман и К. П. Имшенник.)

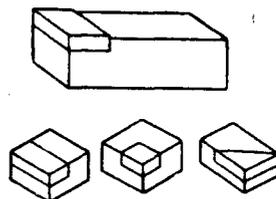
влетворительные результаты дает сварка по методу Игнатъева (см. § 10 гл. IV), при которой отсутствуют потери металла. В некоторых случаях успешно применяется пайка пластинок на машинах для стыковой или точечной сварки.

В настоящее время при изготовлении сварного инструмента находят применение быстрорежущая сталь, содержащая большое количество вольфрама (до 19⁰/₀), и ее заменители с пониженным содержанием вольфрама (например, сталь марки ЭИ262, содержащая 0,85—0,95⁰/₀ С; 8,5—10⁰/₀ W; 4,0—4,6⁰/₀ Cr; 2—2,6⁰/₀ V; <0,45⁰/₀ Mn и <0,45⁰/₀ Si).

Технология сварки высоколегированных инструментальных сталей определяется следующими их свойствами:

а) низкой тепло- и электропроводностью (при комнатной температуре коэффициент теплопроводности быстрорежущей стали $\lambda = 0,055 \text{ кал/см} \cdot \text{сек} \cdot ^\circ\text{C}$, для углеродистой с содержанием 0,3⁰/₀ С $\lambda = 0,10 \text{ кал/см} \cdot \text{сек} \cdot ^\circ\text{C}$; соответственно удельные сопротивления равны 48 $\text{мком} \cdot \text{см}$ и 18—22 $\text{мком} \cdot \text{см}$); это компенсируется неодинаковой установочной длиной заготовок из углеродистой и инструментальной сталей;

б) способностью интенсивно закаливаться на воздухе; закалка может вызывать трещины в околостыковой зоне; для борьбы с этим применяется подогрев, обеспечивающий достаточно широкую зону разогрева стали и искусственно замедленное охлаждение сваренных заготовок (в теплоизолирующей среде или печи); кроме того, после сварки заготовки обязательно отжигаются;



Фиг. 70. Типы наварного инструмента.

в) склонностью к росту зерна и к образованию так называемой ледебуритной эвтектики при перегреве стали выше некоторой предельной для каждой марки стали температуры (1320° для быстрорежущей стали и 1270° для стали ЭИ262); эвтектика выделяется по границам зерен при частичном расплавлении стали и является в охлажденной стали чрезвычайно хрупкой составляющей; эвтектика не может быть растворена в стали при нормальной ее термической обработке; для удаления перегретого металла из стыка при сварке должна применяться достаточная высадка.

Быстрорежущая сталь и ее заменители вполне удовлетворительно свариваются с углеродистой сталью.

Как уже указывалось, сварка инструмента осуществляется оплавлением с подогревом. Установочная длина заготовки из инструментальной стали составляет $(0,5 \div 1,0) d$, где d — диаметр заготовки. Относительно большая установочная длина соответствует заготовке меньшего диаметра. Установочная длина не должна быть меньше 10 мм во избежание интенсивной закалки из-за быстрого отвода тепла в медные электроды машины. Установочная длина заготовки из углеродистой стали в 1,3—1,5 раза больше установочной длины заготовки из инструментальной стали.

Концы заготовок перед началом оплавления должны быть равномерно нагреты до температуры $1100\text{--}1200^\circ$ на участке длиной 5—10 мм. Оплавление проводится достаточно интенсивно со скоростью 1—1,5 мм/сек. Скорость осадки 10—15 мм/сек; удельное давление 3—4 кг/мм². Приведенные в табл. 9 данные (К. П. Имшенник) могут служить для выбора стыковых машин в зависимости от диаметра свариваемых заготовок или площади их поперечного сечения.

Таблица 9

Основные параметры режима стыковой сварки инструмента

Диаметр заготовки в мм	Площадь сечения свариваемых заготовок в мм ²	Плотность тока в а/мм ²	Удельная мощность в квт/см ²	Вторичное напряжение холостого хода в в
8—18	50—250	40—30	10 —8	3,8—4
19—30	250—700	30—20	8 —6	4—4,5
31—40	700—1250	20—15	6 —4,5	4,5—5,5
41—50	1250—2000	15—10	4,5—3,5	5,5—6,5

Примечание. Приведенные в таблице значения плотности тока и удельной мощности соответствуют моменту подогрева; при оплавлении они на 20—50% ниже.

При сварке инструментальной стали с углеродистой инструментальная сталь оплавляется быстрее. Поэтому припуск на оплавление инструментальной стали должен быть больше. В табл. 10 приведены устано-

вочные длины и припуски, обеспечивающие минимальные потери инструментальной стали (К. П. Имшенник). В заводской практике припуски иногда несколько выше (на 30—40%).

Таблица 10

Установочные длины и припуски для стыковой сварки заготовок инструмента из углеродистой и быстрорежущей стали (или ее заменителей)

Диаметр заготовки в мм	Установочная длина для стали в мм		Припуски на сварку для стали в мм		Распределение общего припуска на сварку в мм		
	инструментальной	углеродистой	инструментальной	углеродистой	Подогрев и оплавление	Осадка	
						под током	без тока
8—18	12	20	4	2	3,5	0,5	2,0
19—25	15	20	4	2	3,5	0,5	2,0
26—30	15	20	4	3	4,5	0,5	4,0
31—40	20	25	5	3	5,0	0,5	2,5
41—50	25	30	5	4	5,5	1,0	2,5
51—55	25	35	6	4	6,0	1,0	3,0

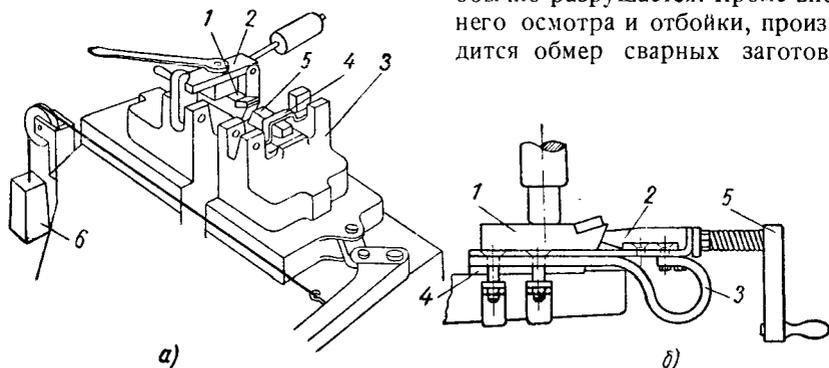
После сварки заготовки любого типа быстро освобождаются из электродов машины и немедленно помещаются в печь с температурой 740—760°, в которой они выдерживаются не менее 6 час. После этого заготовки медленно охлаждаются с печью до 500°. Дальнейшее охлаждение может производиться на воздухе. После такой термической обработки твердость в зоне сварки не превышает 25 единиц по Роквеллу (шкала С). При такой твердости возможны правка и механическая обработка сварной заготовки. После предварительной механической обработки заготовка подвергается нормальной термической обработке (закалке и отпуску) и затем шлифуется для придания ей окончательной геометрической формы и получения требуемого качества поверхности.

При отсутствии необходимой печи заготовки немедленно после сварки помещаются в теплоизолирующую среду (хлопья слюды, инфузорная земля), уменьшающую скорость их охлаждения. Замедленное охлаждение позволяет избежать образования закалочных трещин, но не исключает повышения твердости в зоне сварки. В связи с этим медленно охлажденные заготовки перед механической обработкой отжигаются при температуре 850—870° в течение 2—4 час.

При определении исходной длины заготовок для сварки инструмента, помимо припусков на оплавление и осадку, следует предусматривать припуски на механическую обработку сваренной заготовки. Кроме того, заготовка из инструментальной стали должна быть удлинена на величину зоны термического влияния сварки, в пределах которой режущие свойства стали несколько понижаются (из-за всегда имеющегося при сварке перегрева стали вблизи стыка). Для заготовок диаметром от 6 до 60 мм дополнительные припуски на механическую обработку лежат

в пределах 1,5—3 мм. Для заготовок этих размеров припуск, учитывающий понижение режущих свойств, равен 4—10 мм.

Основные дефекты стыковой сварки инструментальной стали — непровар, трещины и перегрев. Качество сварки инструмента проверяется внешним осмотром и так называемой отбойкой, т. е. ударами от руки заготовкой о край наковальни. Место удара находится на углеродистой стали вблизи стыка. При ударах заготовка поворачивается на 180° вокруг своей продольной оси. Дефектная заготовка при таком испытании обычно разрушается. Кроме внешнего осмотра и отбойки, производится обмер сварных заготовок.



Фиг. 71. Применение стыковой (а) и точечной (б) машин для напайки пластинок на резы. (К. П. Имшенник.)

При разработке режимов сварки качество соединения контролируется макро- и микроструктурой стыка и околостыковой зоны, а также осмотром излома стыка при его разрушении. Качественная сварка характеризуется отсутствием в изломе гладких окисленных участков с оплавленной поверхностью, а также черных или серых окисленных пятен и расслоений.

В промышленности широко применяется напайка пластинок из твердых сплавов (и реже — из инструментальной стали) на державки из углеродистой стали. Для пайки применяются различные способы нагрева (индукционный нагрев, нагрев в печах, соляных ваннах и др.), а также нагрев между электродами стыковых и точечных машин. Для напайки пластинок из быстрорежущей стали и ее заменителей применяются припои с высокой температурой плавления (медноникелевые припои с температурой плавления 1200—1230°). Напайка твердых сплавов производится медным или латунным припоем при более низкой температуре (920—1083°; при специальном бронзовом припое — 1150°). Для защиты от окисления при напайке применяется флюс (обычно измельченная в порошок обезвоженная бура); при напайке титанокарбидных твердых сплавов лучше применять плавленый фтористый калий.

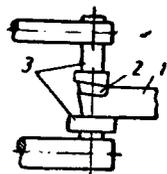
Для напайки могут быть использованы нормальные стыковые и точечные машины. На стыковой машине (фиг. 71, а) резец 1 зажимается в левом зажиме 2. В правом зажиме 3 с помощью скобы 4 укреплается токоподводящая колодка 5, прижимаемая к торцу реза усилием, раз-

виваемым грузом 6. Аналогичная схема токоподвода применяется при пайке на точечной машине (фиг. 71. б). Ток подводится к торцу реза 1 колодкой 2, соединенной гибкой медной шиной 3 с нижним электродом машины 4. Резец изолирован от непосредственного контакта с нижним электродом. Контактное давление регулируется винтом 5.

Основным условием качественной напайки инструмента являются тщательная очистка заготовок в месте пайки и защита от окисления (с помощью флюсов). Заготовки перед пайкой должны тщательно обезжириваться.

Немедленно после напайки инструмент помещается в теплоизоляционную среду, а в дальнейшем для уменьшения внутренних напряжений и хрупкости подвергается отпуску.

При наварке пластинок из быстрорежущей стали державка реза 1 (фиг. 72) и пластинки инструментальной стали 2 зажимаются между электродами 3 точечной (или стыковой) машины. Между державкой и пластинкой предварительно насыпается тонкий слой специального сварочного порошка, состоящего из ферромарганца и буры, иногда (при сварке стали ЭИ262)



Фиг. 72. Схема использования точечной машины для наварки пластинок на резы.

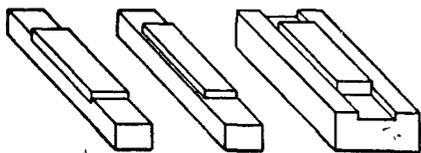
с добавкой меди (для понижения температуры плавления). Заготовки нагреваются импульсами сварочного тока до появления капелек из расплавленного порошка, температура плавления которого подбирается так, чтобы при нагреве до этой температуры обеспечивалась вполне удовлетворительная сварка инструментальной стали с углеродистой. Приложенное к электродам усилие способствует удалению из стыка излишков расплавленного порошка. Порошки в зависимости от состава плавятся при температуре от 1200 до 1290°.

§ 10. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ ПО МЕТОДУ ИГНАТЬЕВА

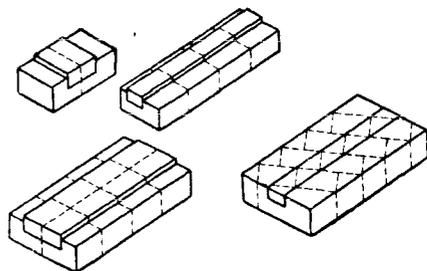
Сварка по методу Игнатъева (см. фиг. 8) может быть наиболее успешно применена в инструментальном производстве. С помощью непрерывного процесса (см. фиг. 8, б) получаются двухслойные полосы большой длины, которые после соответствующей термической обработки разрезаются на отдельные заготовки, используемые для получения того или иного металлорежущего инструмента. Основное затруднение при непрерывной сварке по методу Игнатъева — необходимость очень тщательной защиты свариваемых поверхностей от окисления. С этой целью приходится применять нагрев в специальной защитной (нейтральной) атмосфере, что существенно усложняет процесс.

Прессовая сварка по методу Игнатъева (см. фиг. 8, а) используется для получения коротких заготовок различной формы (фиг. 73). Для провара по всей плоскости касания заготовка из инструментальной стали делается более узкой, чем заготовка из углеродистой стали, или врезаются в нее. Каждая сварная заготовка разрезается после термической обработки на несколько частей (фиг. 74), используемых в качестве вставных зубьев, ножей и т. д.

Сварка по методу Игнатъева осуществляется без расплавления металла. Как указывалось в § 9, инструментальные стали типа быстрорежущих не допускают перегрева, вызывающего при частичном расплавлении стали образование хрупкой ледебуритной эвтектики. Поэтому при сварке по методу Игнатъева чрезвычайно важен равномерный нагрев по всей площади соприкосновения свариваемых заготовок. Так как заготовки нагреваются током, протекающим вдоль их оси, сечение заготовок по всей длине должно быть постоянным (сварка клинообразных и пирамидальных заготовок невозможна). Равномерный нагрев заготовок достигается только при относительно малой скорости нарастания температуры (обычно около $7^\circ \text{C}/\text{сек}$). При этом сварка одной заготовки



Фиг. 73. Типовые заготовки для прессовой сварки по методу Игнатъева.



Фиг. 74. Получение нескольких заготовок инструмента из пластин, сваренных прессовым способом по методу Игнатъева.

продолжается около 3 мин. Производительность процесса, таким образом, относительно невелика. Для ее повышения следует увеличивать размеры свариваемых заготовок. Вес комбинированной заготовки G в кг, которая может быть сварена на машине мощностью P ква, ориентировочно может быть рассчитан по формуле

$$G = \frac{P}{50}. \quad (46)$$

Усилие осадки P_1 (см. фиг. 8, а), сжимающее заготовки при сварке, должно обеспечивать удельное давление на свариваемой поверхности, равное $1-1,5 \text{ кг}/\text{м}^2$. Усилие нажатия токоподводящих колодок (P_2) подбирается так, чтобы нагрев заготовок в пределах свариваемого участка был по возможности равномерным; при чрезмерном усилии в контактах в них выделяется мало тепла, и концы заготовок, интенсивно охлаждаемая, оказываются холоднее их середины; при недостаточном усилии концы перегреваются.

При сварке по методу Игнатъева часто применяются специальные сварочные порошки, расплавляющиеся при требуемой температуре. Простейший порошок для приварки быстрорежущей стали, плавящийся при $T = 1260-1290^\circ$, состоит из 60% углеродистого ферромарганца и 40% прокаленной буры. Порошок хранится в сухом мешке и перед сваркой насыпается ровным слоем толщиной $1-1,5 \text{ мм}$ между державкой и привариваемой пластинкой.

При сварке по методу Игнатъева, осуществляемой без расплавления, особенно важно плотное прилегание деталей перед нагревом (в зазор между такими деталями труднее проникает воздух и уменьшается опасность окисления и непровара). Свариваемые поверхности должны быть хорошо очищены (лучшие результаты дает их шлифование). Непосредственно перед сваркой эти поверхности желателен дополнительно очистить наждачной шкуркой с тем, чтобы на них не оставалось следов ржавчины или других загрязнений. При сварке без сварочного порошка для защиты от окисления между державкой и пластинкой насыпается тонкий слой буры.

При наварке пластинок из быстрорежущей стали температура нагрева заготовок не должна превышать 1300° , о чем можно судить по началу плавления окалины. При сварке сталей-заменителей эта температура должна быть еще ниже. Стали-заменители обычно свариваются с использованием порошков, начало плавления которых указывает на достаточный нагрев.

Заготовки, сваренные по методу Игнатъева, проходят такую же термическую обработку, как заготовки инструмента, сваренные встык оплавлением.

§ 11. СТЫКОВАЯ СВАРКА ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Алюминий и медь, а также многие их сплавы характеризуются высокой электро- и теплопроводностью, хрупкостью при температурах, близких к температуре сварки, и очень узким интервалом температур, в котором эти материалы обладают необходимой для сварки пластичностью.

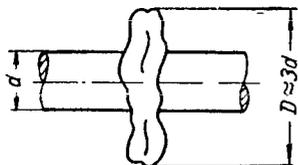
Сварка меди оплавлением затруднительна из-за исключительно высокой теплопроводности: на торцах не удается создать слой расплавленного металла, и устойчивое оплавление не поддерживается. Медные стержни небольшого диаметра (обычно до 8—10 мм) могут удовлетворительно свариваться сопротивлением. При этом плотность тока должна быть в 3—3,5 раза выше, чем при сварке деталей того же размера из малоуглеродистой стали. Обязательное условие успешной сварки меди — автоматическая подача (осадка). При достижении в месте стыка температуры, близкой к температуре плавления меди, металл быстро размягчается, и в этот момент автоматически производится осадка с большой скоростью. При запаздывании осадки или ее недостаточной скорости медь в зоне стыка может вылавиться, и стык окажется дефектным. Удельное давление осадки лежит в пределах $1—1,5 \text{ кг/мм}^2$.

Латунные стержни также могут свариваться встык сопротивлением. При этом плотность тока несколько ниже, чем при сварке меди (при условии одинаковой длительности процесса), и составляет около $2,5 j_{ст}$, где $j_{ст}$ — плотность тока при сварке малоуглеродистой стали.

Медь и латунь могут удовлетворительно свариваться оплавлением со сталью. В этом случае оплавляется главным образом стальная деталь. Поэтому установочная длина стальной детали увеличивается,

несмотря на меньшую теплопроводность стали, с тем, чтобы после ее оплавления на значительную длину [при сварке стали с медью на $(1 \div 1,5)d$, где d — диаметр свариваемых деталей] стык не оказался слишком близко к электродам. При сварке стального стержня с медным установочная длина первого составляет $(2,5 \div 3)d$, второго $(1 \div 1,5)d$. При сварке стального стержня с латунным их установочные длины одинаковы и равны $(1,5 \div 2)d$.

Сварка встык алюминия и его сплавов возможна как сопротивлением, так и оплавлением. При сварке сопротивлением металл в зоне



Фиг. 75. Форма стыка при сварке алюминиевых стержней.

стыка нагревается почти до расплавления, и в сильно размягченном состоянии производится осадка. Стык после сварки имеет значительное местное утолщение в виде грата (фиг. 75). Плотность тока при сварке сопротивлением алюминия примерно в 2 раза выше, чем при сварке стали (при той же длительности процесса). При сопоставлении плотности тока при сварке стали и цветных металлов необходимо учитывать, что сварка последних должна производиться с большой скоростью (иначе до-

стигнуть требуемой температуры практически не удастся), в то время как стальные детали могут нагреваться сравнительно медленно. В связи с этим мощность, необходимая для сварки деталей из цветных металлов (меди, латуни и алюминия), значительно превышает мощность, нормально потребляемую для сварки стальных деталей того же сечения. Например, для сварки сопротивлением стержней диаметром 8 мм требуется: при малоуглеродистой стали — 5 ква; при меди — 50 ква; при алюминии — 15 ква и при латуни — 25 ква.

В последнее время начинает применяться сварка алюминия и его сплавов оплавлением. Для получения качественных результатов необходимо применение значительных скоростей оплавления и осадки. При таком процессе предупреждается окисление металла в стыке, опасность которого при сварке алюминия очень велика. Алюминиевые детали сечением до 300 мм² оплавляются на 10—12 мм в течение 1,5—3 сек. Таким образом, скорость оплавления достигает 8 мм/сек (при сварке стали она редко превышает 2—3 мм/сек). Скорость осадки при сварке алюминия не должна быть ниже 60—80 мм/сек. При таких скоростях оплавления и осадки требуются машины относительно большой мощности с автоматическим управлением. Необходимая плотность тока при сварке оплавлением алюминиевых сплавов зависит от состава сплава. При сварке алюминия она достигает 150 а/мм². Необходимое удельное давление осадки при сварке оплавлением высокопрочных алюминиевых сплавов может достигать 10—12 мм².

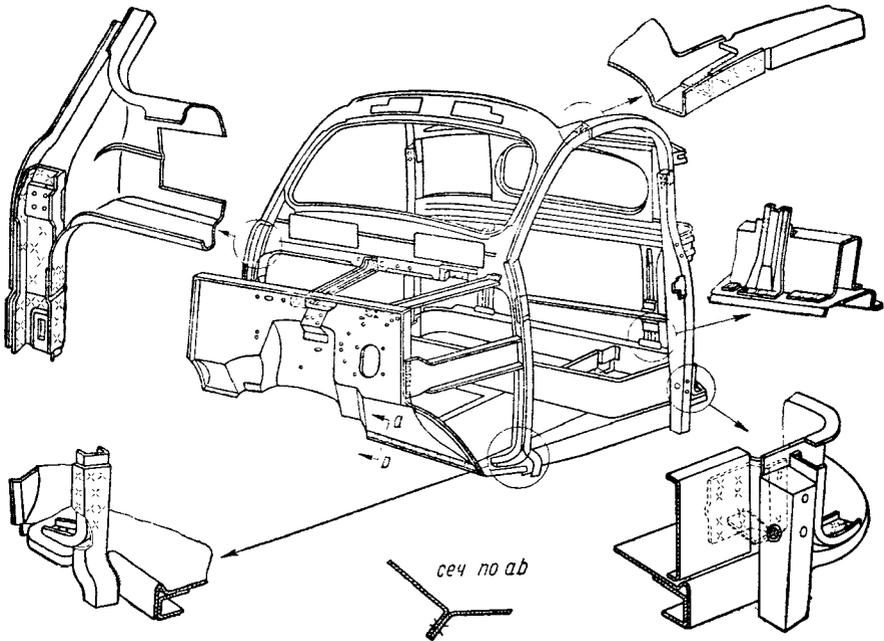
Возможна также сварка оплавлением алюминия с медью (Г. В. Недзвецкий). При этом оплавление идет в основном за счет алюминиевой детали и должно идти со скоростью не менее 5—6 мм/сек.

ГЛАВА V

ТЕХНОЛОГИЯ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ

§ 1. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ И ТИПОВЫЕ УЗЛЫ

Точечная сварка широко применяется в штампо-сварных конструкциях, в которых две или более относительно простых по форме штампованных деталей соединяются сварными точками для образования узла



Фиг. 76. Каркас кузова автомобиля:
× — места постановки сварных точек (ГАЗ).

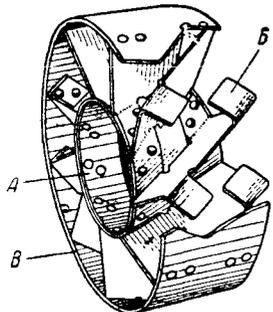
сложной конфигурации (при изготовлении таких конструкций иногда применяются одновременно различные способы сварки, например, точечная и электродуговая). Большое количество штампо-сварных конструкций встречается в современном автомобилестроении. На фиг. 76 показана сложная штампо-сварная конструкция каркаса кабины автомобиля, собираемого с помощью точечной сварки.

Точечная сварка успешно применяется для соединения листовой обшивки с каркасами из прокатных или штампованных профилей. Этим

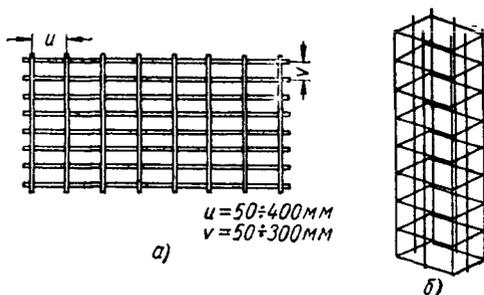
способом может крепиться обшивка цельнометаллических железнодорожных вагонов, кабин и дверей лифтов, бункеров сельскохозяйственных машин и т. д.

В самолетостроении точечная сварка применяется в узлах из легких сплавов, а также из низколегированных и высоколегированных сталей. Пример одного из таких штампо-сварных узлов дан на фиг. 77 (завихритель собран из внутреннего и наружного колец *A* и *B* и штампованных лопаток *B*).

Очень важная область применения точечной сварки, в особенности в связи с возведением грандиозных строек коммунизма, — сварка сеток



Фиг. 77. Штампо-сварная конструкция завихрителя.



Фиг. 78. Примеры сваренной вкрест точками арматуры железобетона:

a — плоская сетка; *b* — каркас колонны.

и каркасов из стальных стержней для армирования железобетона. В сетках и пространственных каркасах отдельные прутки диаметром 4—25 мм и выше свариваются в местах пересечения вкрест (фиг. 78).

Точечная сварка наиболее широко применяется в производстве крупных и мелких изделий из металла относительно малой толщины (в крупных стальных изделиях — до 2,5—3 мм; в мелких — до 5—6 мм). Создание новых типов точечных машин позволяет существенно расширить область применения точечной сварки стальных конструкций (до толщины 8—10 мм и выше).

Целесообразность применения точечной сварки при изготовлении того или иного узла в очень большой степени зависит от наличия или возможности приобретения соответствующего сварочного оборудования. При сварке компактных изделий небольшого веса обычно применяются стационарные машины универсального типа. Изделия большого размера, и в особенности пространственные конструкции, требуют применения легкого переносного оборудования. Наконец, при сварке изделий большого размера с большим количеством сварных точек желательно применение многоточечных машин. При этом все точки могут свариваться одновременно или несколькими последовательными группами. В последнем случае машина перемещается относительно изделия (например, боковины пассажирского вагона), или изделие специальным механизмом протягивается через машину.

§ 2. ПРОЦЕСС ОБРАЗОВАНИЯ СВАРНОЙ ТОЧКИ

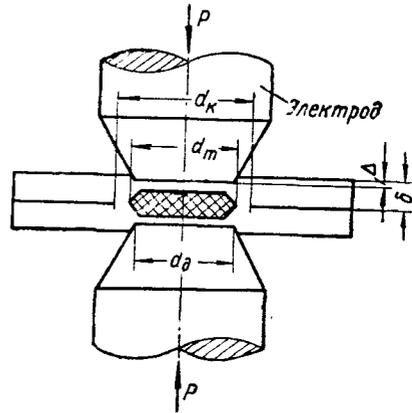
Процесс точечной сварки вне зависимости от рода свариваемого материала может быть разделен на три следующих друг за другом этапа: предварительное сжатие свариваемых деталей между электродами точечной машины, нагрев деталей в месте сварки до требуемой температуры и охлаждение их после сварки.

Назначение первого этапа — получение плотного контакта между деталями в месте их сварки. С этой целью усилие, развиваемое электродами машины, должно достигать своего полного значения до включения сварочного тока. В противном случае при включении возможны прожог деталей и обгорание контактной поверхности электродов.

На втором этапе две или более детали, сжатые между электродами, нагреваются теплом, выделяемым при протекании электрического тока в контактных сопротивлениях и внутри деталей (за счет их собственного сопротивления). При этом нагрев имеет местный характер — большая часть тепла выделяется в столбике металла, непосредственно зажатом между контактными поверхностями электродов (столбик диаметром d_s на фиг. 11, а). Однако и металл, окружающий этот столбик, тоже непосредственно, хотя и медленнее, нагревается электрическим током, протекающим с меньшей плотностью за пределами центрального столбика (см. фиг. 22). Нагрев центрального столбика сопровождается значительным отводом тепла в окружающие холодные слои металла, а также в электроды. В результате этого наиболее сильно нагревается центральная часть точки — ее ядро (на фиг. 79 заштриховано).

При некоторой температуре под действием усилия P в контакте между деталями начинают образовываться общие кристаллы — начинается сварка (без расплавления металла). При дальнейшем нагреве металл в ядре точки расплавляется, образуя после охлаждения прочное соединение между деталями. В современной практике применяется исключительно сварка с расплавлением ядра, так как только в этом случае удается обеспечить устойчивые показатели прочности сварных точек.

Во время нагрева расплавленный металл в ядре диаметром d_m (фиг. 79) удерживается от вытекания плотно сжатым кольцом пластичного металла, окружающим ядро (это кольцо на фиг. 79 ограничено диаметром d_k). Если это кольцо недостаточно плотно, то жидкий металл, находящийся в ядре под давлением, частично выбрасывается из ядра — происходит выплеск металла. Выплеск наблюдается в двух



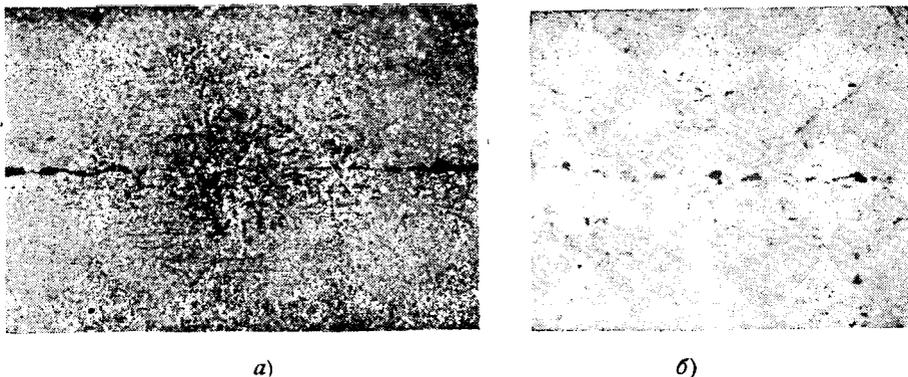
Фиг. 79. Схематический разрез сварной точки.

случаях: при чрезмерно быстром нагреве и малом усилии на электродах (металл начинает плавиться до того, как успевает образоваться плотное кольцо вокруг ядра) и к концу нагрева, когда вследствие чрезмерно длительного нагрева размеры ядра увеличиваются настолько, что усилие от электродов оказывается недостаточным для плотного сжатия уплотняющего кольца.

При рациональном технологическом процессе точечной сварки диаметр ядра точки увеличивается с увеличением толщины свариваемых деталей и связан с ней следующей приближенной зависимостью:

$$d_m = 2\delta + 3 \text{ мм},$$

где δ — толщина в мм более тонкой из свариваемых деталей.



Фиг. 80. Структура точки, сваренной без расплавления (малоуглеродистая сталь):
 а — макроструктура ($\times 4$); б — микроструктура ($\times 200$).

Под действием приложенного к электродам усилия на поверхности свариваемых деталей образуется вмятие, особенно глубокое при значительных выпесках. При нормальном процессе сварки глубина вмятий Δ не должна превышать 10—20% толщины δ свариваемых деталей.

При выключении сварочного тока до расплавления ядра точки в структуре отсутствуют макродефекты (раковины, поры). Однако крупное зерно (фиг. 80, а) и цепочки неметаллических включений (фиг. 80, б) приводят в этом случае к значительной хрупкости соединения. Приведенная структура характерна для непровара при точечной сварке.

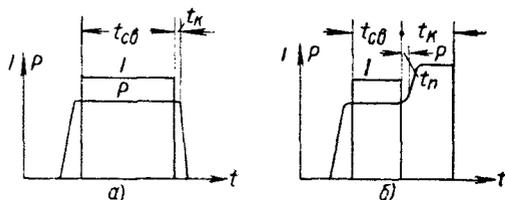
При сварке с расплавлением ядро точки при охлаждении кристаллизуется в виде дендритов (см. фиг. 34, а). Кристаллизация металла сопровождается его значительной усадкой, в результате которой в ядре могут образоваться раковины и поры (см. фиг. 34, б). Обжатие охлаждаемого металла электродами способствует его уплотнению. В связи с этим снятие давления с электродов всегда должно несколько запаздывать относительно момента выключения сварочного тока (т. е. момента прекращения сварочного нагрева). Это запаздывание (t_k) должно быть достаточным для кристаллизации всего расплавленного металла

в ядре точки. При сварке тонкого металла (например, стали толщиной 1—1,5 мм) запаздывание может ограничиваться 0,1—0,2 сек.; при сварке стали толщиной 8—10 мм для окончания кристаллизации металла в ядре требуется 1,5—2,5 сек. В простейшем случае, наиболее распространенном на практике, график сжатия электродов и включения сварочного тока имеет вид, показанный на фиг. 81, а. Усилие P достигает своего максимального значения до включения сварочного тока I . Ток обязательно выключается до снятия усилия с электродов. Это усилие остается постоянным на протяжении всего цикла сварки.

В тех случаях, когда усадочные дефекты особенно нежелательны или когда вероятность их появления очень велика (при сварке алюминиевых сплавов, при сварке стальных деталей толщиной более 4—6 мм), часто применяется увеличение усилия, приложенного к электродам (фиг. 81, б) во время кристаллизации ядра t_k (прилагается ковочное усилие P и I). Важен момент приложения этого усилия. Он должен следовать за выключением сварочного тока. Однако при большом запаздывании ковочного давления ($t_n > 0,2$ сек.) оно бесполезно. При чрезмерно раннем его приложении ($t_n < 0$) оно может привести к выдавливанию расплавленного металла из ядра — выплеску, сопровождаемому глубоким вмятием поверхности деталей.

Во многих случаях, в частности при сварке стали, режим охлаждения сварной точки существенно влияет на ее механические свойства. Обычно охлаждение точки начинается между электродами (во время действия ковочного давления), заканчиваясь на воздухе. Вследствие интенсивного отвода тепла скорость охлаждения в электродах значительно превышает скорость охлаждения на воздухе, в особенности при малой толщине (1—2 мм) свариваемого материала. В связи с этим излишнее удлинение действия ковочного давления может приводить к вредной закалке стали в зоне сварной точки и к хрупкости точек. Например, при точечной сварке обычной малоуглеродистой стали толщиной 1,5 мм с содержанием 0,2% С увеличение длительности приложения ковочного давления с 0,1 до 1,5 сек. приводило к резкому изменению характера разрушения сварной точки во время испытания — при малой длительности наблюдался вязкий, а при большой длительности — хрупкий излом.

Описанные процессы типичны для точечной сварки любых металлов и сплавов. Их ход определяется условиями нагрева и охлаждения и приложенным к электродам усилием. В связи с этим *основными*



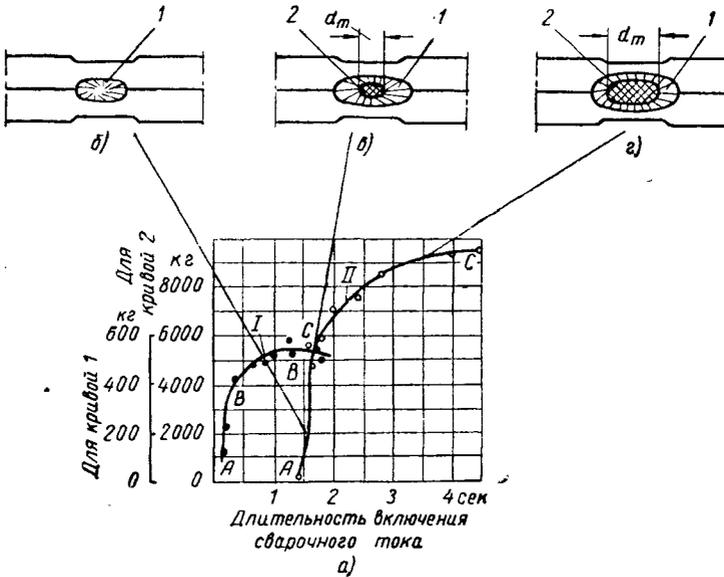
Фиг. 81. Типовые диаграммы изменения тока I и усилия P , приложенного к электродам, при точечной сварке:

а — нормальный процесс; б — сварка с применением увеличенного ковочного усилия ($t_{св}$ — длительность включения сварочного тока; t_k — длительность приложения ковочного усилия; t_n — пауза между выключением сварочного тока и приложением увеличенного ковочного усилия).

параметрами режима точечной сварки являются: а) сила сварочного тока и длительность его включения, а также сопротивление свариваемых деталей, влияющие на их нагрев, и б) приложенное к электродам усилие и размеры контактной поверхности электродов. Два последних параметра одновременно влияют как на пластическую деформацию металла в зоне сварки, так и на величину электрического сопротивления свариваемых деталей (см. гл. II, § 4), существенно сказываясь, таким образом, на условиях нагрева сварной точки.

§ 3. ВЛИЯНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА НА РАЗМЕРЫ И ПРОЧНОСТЬ СВАРНОЙ ТОЧКИ

Влияние силы тока и длительности его включения на размеры, структуру и прочность сварной точки может быть наиболее полно изучено при сварке серии образцов с постепенным изменением одного из иссле-



Фиг. 82. Зависимость разрушающей нагрузки и макроструктуры сварной точки от длительности сварки:

а — зависимость разрушающей нагрузки от длительности сварки малоуглеродистой стали толщиной 1 мм (*I*) и низколегированной стали толщиной 5 мм (*II*); *б* — схематический разрез точки, сваренной без расплавления (полный непровар); *в* — разрез точки с литым ядром малого размера (частичный непровар); *г* — разрез точки с нормальным ядром (нормальный провар); 1 — зона крупного зерна; 2 — литое ядро.

дуемых параметров (все остальные условия сварки остаются без изменения). На фиг. 82, *а* приведена полученная этим путем зависимость прочности сварной точки от длительности включения сварочного тока для серии образцов из малоуглеродистой стали толщиной 1 мм (кривая *I*) и низколегированной стали толщиной 5 мм (кривая *II*). Как

видно из графика, ни марка материала, ни его толщина не оказывают существенного влияния на характер получаемой зависимости. Каждая из приведенных кривых имеет крутой участок AB , соответствующий, как показали изломы испытанных образцов, сварке без расплавления (схематический разрез по оси такой точки показан на фиг. 82, б), и пологий участок BC при сварке с расплавлением ядра. Размеры ядра (фиг. 82, в и г) постепенно увеличиваются с увеличением длительности включения тока (или силы тока). Сначала этот рост быстрый, а затем вблизи точки C он замедляется.

Диаметр ядра точки d_m (см. фиг. 79), определяющий ее рабочее сечение и прочность, не может увеличиваться беспредельно. Максимальный диаметр ядра связан с диаметром контактной поверхности электрода d_e зависимостью $d_m = (0,9 \div 1,4) d_e$. Дальнейшее увеличение ядра невозможно, так как оно сопровождается значительным выплеском металла из ядра и глубоким вмятием поверхности деталей. Отношение диаметра ядра к диаметру электрода может быть тем больше, чем толще свариваемый материал и чем „мягче“ режим сварки.

Сварные точки стабильной прочности, т. е. точки, дающие при их испытании близкие показатели, могут быть получены только при сварке с расплавлением, так как при сварке без расплавления на участке AB незначительные изменения длительности нагрева или других параметров, влияющих на тепловой процесс (неизбежные в производственных условиях), вызывают существенные изменения прочности сварной точки. Наилучшие результаты по стабильности дают режимы, приближающиеся к точке C (фиг. 82, а), так как при этом одновременно прочность точки высока и стабильна. Снижение прочности точки при переходе за C связано с перегревом точки и значительным вмятием поверхности свариваемых деталей.

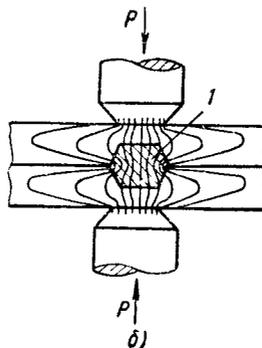
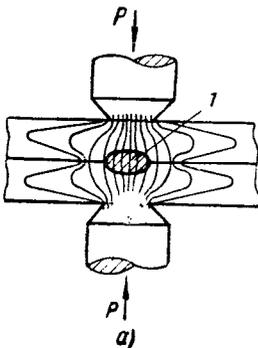
Если измерить сечения и диаметры сварных точек по их изломам и построить кривые зависимости этих величин от длительности нагрева или силы тока, то можно получить график, сходный с графиком на фиг. 82, а. В зависимости от условий нагрева площадь сечения и диаметр сварной точки изменяются от нуля до своих максимальных значений.

Таким образом, и размеры сварной точки и ее прочность определяются условиями сварочного нагрева, т. е. технологическим процессом сварки. В этом состоит принципиальное отличие сварной точки от таких соединительных элементов, как, например, заклепка и болт, размеры которых не связаны с технологическим процессом и могут быть непосредственно проконтролированы.

Величина электрического сопротивления свариваемых деталей и контактов между ними существенно влияет на процесс выделения тепла при точечной сварке, а следовательно, должна влиять и на размеры и прочность сварной точки. Для получения сварных точек стабильной прочности необходимо, чтобы эти сопротивления по возможности колебались в узких пределах. Для обеспечения постоянства контактного сопротивления обычно применяется специальная подготовка поверхности деталей перед их точечной сваркой. С этой целью поверхность деталей

тщательно очищается (пескоструйная очистка, травление или механическая обработка) или покрывается (в процессе травления) тонкой пленкой окислов, обладающей небольшим и постоянным по величине сопротивлением.

Наличие на поверхности деталей естественной пленки окислов (окалина или ржавчины при сварке стали, Al_2O_3 — при сварке алюминиевых сплавов) оказывает очень большое влияние на ход сварки и на прочность точки. При большой толщине пленки ее сопротивление настолько велико, что она является изоляцией и препятствует протеканию тока в сварочной цепи. В этом случае сварка невозможна. Чаще под давлением электродов происходит местное разрушение пленки, и сварочная цепь замыкается.



Фиг. 83. Схема линий тока:

а — при точечной сварке хорошо очищенных деталей; б — при сварке деталей, покрытых окислами; I — литое ядро, образующееся при одинаковой длительности нагрева.

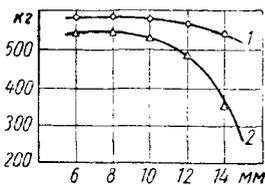
ядра идет нормально, но в отличие от сварки очищенных деталей ядро все время окружено зоной, в которой соприкасающиеся поверхности покрыты пленкой с высоким электрическим сопротивлением. При сварке очищенных деталей ток свободно „растекается“, как это показано на фиг. 83, а; при сварке деталей с пленкой, имеющей высокое сопротивление, поле тока сжато в ядре, как это схематически показано на фиг. 83, б; при сварке неочищенных деталей плотность тока в ядре выше, нагрев идет интенсивнее и при равной длительности включения сварочного тока прочность точки (и ее размер) может быть даже выше, чем при сварке чистого металла. Однако сварка неочищенного металла, как правило, не рекомендуется, так как при этом прочность точки не стабильна, значительное сопротивление в контакте электрод — деталь вызывает перегрев и быстрый износ электродов; наличие в некоторых пленках (например, в ржавчине) большого количества влаги приводит к значительному насыщению газами металла расплавленного ядра, которые, выделяясь при охлаждении, увеличивают рыхлость ядра и вызывают значительные выплески.

Необходимое постоянство собственного сопротивления деталей на участке между электродами достигается соблюдением следующих условий (см. гл. II, § 4): а) постоянством химического состава и толщины сва-

ной цепи замыкается. При этом наличие окислов следующим образом сказывается на процессе сварки. Вследствие большого контактного сопротивления в первый же момент включения сварочного тока в контакте выделяется очень большое количество тепла — происходит мгновенное местное расплавление металла, сопровождаемое выплеском.) Далее нагрев

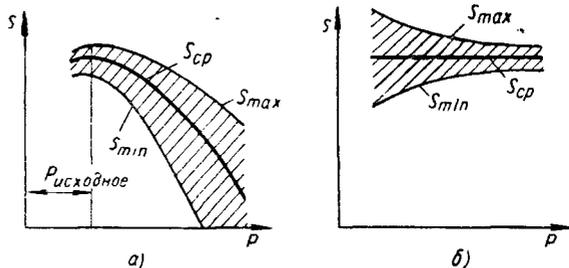
риваемого материала; б) постоянством размеров контактной поверхности электродов и приложенного к ним усилия. Исходные размеры контактной поверхности электрода, устанавливаемые технологическим процессом, не остаются при сварке постоянными: вследствие систематического износа эти размеры постепенно увеличиваются.

С увеличением диаметра контактной поверхности электродов (остальные параметры процесса, в том числе приложенное к электродам усилие, остаются без изменения) прочность сварной точки вначале медленно, а затем быстро понижается (фиг. 84). Это объясняется уменьшением плотности тока. Кривая 1 соответствует режиму сварки, близкому



Фиг. 84. Зависимость прочности сварной точки (сварка малоуглеродистой стали толщиной 1 мм) от диаметра контактной поверхности электродов:

1 — при сварке на режиме, близком к точке С (фиг. 82, а);
2 — при сварке на режиме, близком к точке В (фиг. 82, а)



Фиг. 85. Типовые зависимости прочности сварных точек от приложенного к электродам усилия:

а — изменяется только усилие P (остальные параметры режима постоянны); б — изменения P сопровождаются изменением тока или длительности его включения, обеспечивающим неизменную среднюю прочность точки; S_{max} — максимальная прочность (разрушающая нагрузка) сварной точки; S_{cp} — средняя прочность точки; S_{min} — минимальная прочность точки.

к точке С на фиг. 82, а, — в этом случае прочность точки относительно мало чувствительна к изменению $d_э$. Кривая 2 соответствует сварке с расплавлением ядра по режиму, близкому к точке В, причем чем ближе этот режим к В (фиг. 82, а), тем более резко сказывается изменение $d_э$ на прочности точки.

Усилие, приложенное к электродам, — один из важнейших параметров точечной сварки. Оно оказывает двойное влияние на результаты сварки: а) регулирует интенсивность нагрева в зоне сварки и б) определяет область и степень пластической деформации металла в этой же зоне.

С увеличением усилия P (см. фиг. 22, б и в) уменьшаются сопротивление и плотность тока в зоне сварки и замедляется нагрев. При постоянстве остальных параметров режима размеры ядра и прочность точки понижаются (фиг. 85, а). Одновременно с понижением средней прочности точки увеличивается степень рассеяния результатов — снижается стабильность качества. Последнее объясняется тем, что при значительном росте усилия P и при постоянстве остальных параметров размер расплаваемого при нагреве ядра точки резко уменьшается и, наконец, литое ядро не образуется вовсе — причины нестабильности при сварке без расплавления уже были рассмотрены выше (см. фиг. 82).

Если увеличение усилия сопровождается удлинением нагрева или повышением силы сварочного тока (так, чтобы средняя прочность сварной точки оставалась при этом неизменной), то с ростом приложенного к электродам усилия прочность точек становится более стабильной (фиг. 85, б). Это объясняется тем, что при неплотно собранных перед сваркой деталях часть усилия затрачивается на их деформирование до начала сварочного нагрева, и действительное усилие, действующее в контакте между деталями, как правило, меньше усилия, приложенного к электродам. Чем больше последнее, тем в относительно меньшей степени непостоянное по величине усилие, необходимое для деформирования деталей, сказывается на усилии, развиваемом непосредственно в контакте между ними, и тем стабильнее условия сварки — отклонения размеров и прочности сварных точек от средних значений при этом будут минимальными.

Как указывалось выше, сварка с расплавлением, всегда сопровождаемая усадкой металла, может приводить к появлению в ядре усадочных пороков. Эти пороки наблюдаются при точечной сварке любых металлов и сплавов. В частности, при сварке малоуглеродистой стали было установлено, что: а) при одинаковых условиях сварки размеры раковины в ядре точки увеличиваются с увеличением объема расплавления при сварке металла, а следовательно, с повышением толщины свариваемых деталей; б) в отдельных случаях выплески ведут к увеличению пороков в ядре и в) загрязнение поверхности свариваемых деталей приводит к заметному увеличению дефектов в ядре (причины этого были рассмотрены выше).

Величина удельного давления электродов, достаточного для уплотнения ядра точки во время его кристаллизации и усадки, зависит от: а) рода свариваемого материала; б) его толщины и в) режима сварки.

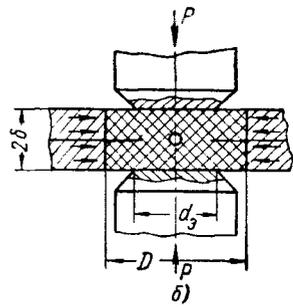
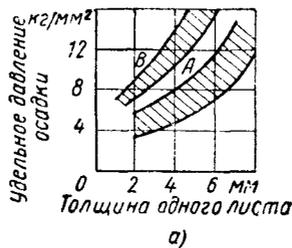
Чем выше сопротивление свариваемого металла пластической деформации при высоких температурах, тем соответственно выше должно быть удельное давление электродов. При сварке конструкционных легированных сталей это давление выше, чем при сварке малоуглеродистой стали; при сварке нержавеющей и жаропрочных сталей оно имеет наибольшее значение.

Давление, необходимое для уплотнения ядра, быстро возрастает с увеличением толщины свариваемых деталей (фиг. 86, а). Это может быть объяснено тем, что с увеличением толщины свариваемых деталей понижается температура на их поверхности (в контакте с электродами) к концу отвердевания металла в ядре из-за большей длительности процесса кристаллизации — пластическая деформация затрудняется, а необходимое для ее осуществления удельное давление растет.

Необходимое для уплотнения удельное давление заметно возрастает с уменьшением длительности сварочного нагрева (с увеличением жесткости режима сварки). Нагретый до высокой температуры центральный столбик металла, деформируемый электродами (заштрихован на фиг. 86, б), окружен относительно холодным металлом, как бы образующим вокруг этого столбика матрицу диаметром D . Чем меньше длительность сварочного нагрева, тем меньше зона разогрева и тем жестче эта матрица,

следовательно, тем труднее деформируется центральный столбик и тем большее давление требуется для его полного уплотнения. Несвободная деформация центрального столбика металла приводит, в частности, к тому, что необходимые для уплотнения металла удельные давления при точечной сварке значительно выше давлений осадки, применяемых при стыковой сварке того же металла.

В тех случаях, когда для уплотнения ядра требуется очень высокое удельное давление, затрудняющее нагрев деталей из-за значительного уменьшения плотности тока и электрического сопротивления, во время протекания сварочного тока используется умеренное давление, сопровождаемое после выключения тока большим ковочным давлением (см. фиг. 81, б).



Фиг. 86. Зависимость удельного давления осадки, необходимого для уплотнения ядра точки, от толщины деталей (малоуглеродистая сталь) для мягкого (А) и жесткого (В) режимов сварки (а) и схема сил, действующих в момент уплотнения ядра (б).

Плотность металла в ядре точки зависит также от формы контактной поверхности электродов. Электроды со сферической поверхностью обеспечивают при равных условиях более плотный металл в ядре, чем электроды с рабочей частью в виде усеченного конуса.

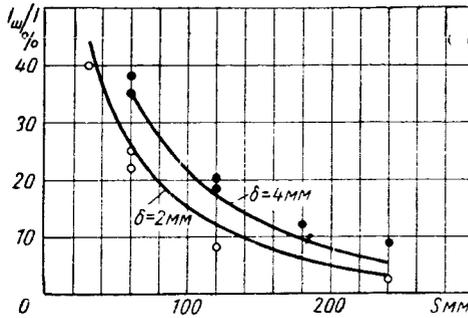
§ 4. ВЛИЯНИЕ ШУНТИРОВАНИЯ ТОКА НА РАЗМЕРЫ И ПРОЧНОСТЬ СВАРНОЙ ТОЧКИ

Явление шунтирования тока при контактной сварке было рассмотрено в § 10 гл. II. Шунтирование оказывает очень большое влияние на результаты точечной сварки любых металлов и нередко является причиной ее неудовлетворительного качества. Шунтирование при точечной сварке сопровождается не только ответвлением части электрического тока через ранее сваренные точки или через случайные контакты между деталями, но и передачей части приложенного к электродам усилия в точках касания свариваемых деталей, лежащих вне зоны сварки. В результате этого усилия, действующее в месте сварки в контакте между деталями, оказывается меньше усилия, приложенного к электродам. В связи с тем, что при шунтировании и ток и усилие в месте сварки уменьшаются, причем степень этого уменьшения непостоянна, создаются условия, существенно понижающие стабильность качества (прочности) сварных точек.

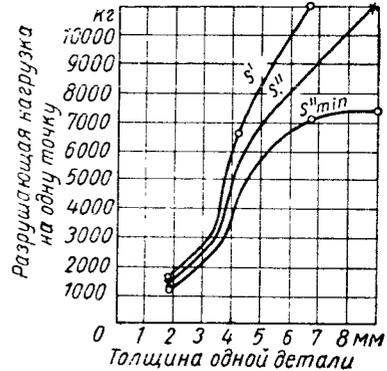
Степень шунтирования тока уменьшается с увеличением расстояния между центрами смежных точек (шага точек). Это иллюстрируется графиком зависимости отношения тока в шунте к полному

току (в процентах) от шага точек (К. А. Кочергин) для сварки пластин из малоуглеродистой стали толщиной 2 и 4 мм (фиг. 87). Как видно из графика, при наиболее часто применяемом шаге точек (30—50 мм) ток шунтирования достигает 40—25% от полного тока. Степень шунтирования тока увеличивается с увеличением толщины свариваемых деталей.

Влияние толщины свариваемых деталей (малоуглеродистая сталь) и шага на прочность сварных точек иллюстрируется диаграммой, приведенной на фиг. 88, на которой S' — средняя разрушающая нагрузка при



Фиг. 87. Зависимость отношения тока в шунте к полному току в сварочной цепи от толщины свариваемых деталей (δ) и шага (s) точек (К. А. Кочергин).



Фиг. 88. Зависимость прочности сварной точки от толщины деталей (малоуглеродистая сталь) при различных условиях шунтирования тока.

испытании образцов, сваренных одной точкой без шунтирования, S'' — средняя разрушающая нагрузка аналогичного образца, но с точкой, сваренной при наличии шунтирования (испытанная точка сваривалась второй с шагом $c = 3d$; перед испытанием образца первая точка высверливалась, как показано на фиг. 109, в), S''_{min} — минимальная прочность точки, сваренной с шунтированием, зарегистрированная в процессе испытаний.

Отношение $\frac{S''}{S'}$ характеризует влияние шунтирования на прочность точки, а отношение $\frac{S''_{min}}{S'}$ — его влияние на стабильность прочностных свойств точек.

Как видно из фиг. 88, при шаге $c = 3d$ и толщине деталей 2—8 мм средняя прочность второй точки составляет 80—90% прочности первой (сваренной при отсутствии шунтирования). Рассеивание результатов испытаний, умеренное при толщине деталей до 4 мм, быстро растет с увеличением их толщины.

Влияние шунтирования на прочность точки резко возрастает с увеличением числа одновременно свариваемых деталей. Например,

при сварке двух деталей из малоуглеродистой стали толщиной 2 мм рассеивание результатов испытания образцов, сваренных внахлестку, близко к 15%, в то время как при одновременной сварке трех деталей той же толщины рассеивание результатов достигает 30%. В связи с этим шаг точек при одновременной сварке трех деталей должен быть больше, чем при сварке только двух деталей той же толщины.

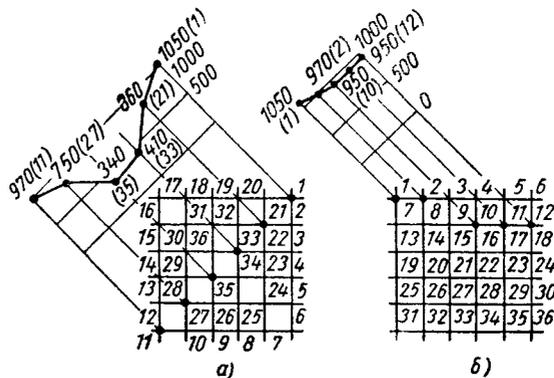
Снижение прочности точки в результате шунтирования может быть особенно велико при расположении свариваемой точки в близком соседстве более чем с одной уже сваренной точкой. Например, при сварке точками пересечений прутков диаметром 6,5 мм в последовательности, показанной цифрами на фиг. 89, а, разрушающая нагрузка последней, 36-й точки, окруженной при сварке четырьмя близко расположенными точками, составляла всего 30% прочности первой точки. При изменении последовательности сварки в соответствии с фиг. 89, б наибольшее понижение прочности в результате шунтирования не превышало 10%. Это, в частности, указывает на важность продуманного порядка в постановке отдельных точек, образующих соединение.

Состояние поверхности свариваемых деталей также существенно влияет на степень шунтирования сварочного тока. Например, при сварке проволочных сеток из хорошо очищенных прутков малоуглеродистой стали и из прутков, покрытых слоем окалины и ржавчины, оказалось, что прочность точек в результате шунтирования понижалась для чистой сетки на 10–12%, а для загрязненной — на 40–50%.

Усилие, передаваемое в контакте между деталями непосредственно в свариваемой точке,

$$P_k = P - P_d,$$

где P — усилие, приложенное к электродам, и P_d — усилие, затрачиваемое на деформирование деталей, необходимое для получения плотного контакта между ними в зоне свариваемой точки. В предельном случае (при некачественной заготовке или сборке деталей и значительной их жесткости) зазор между деталями в месте сварки может оказаться настолько большим, что необходимое для деформирования деталей усилие P_d будет равно или больше приложенного к электродам



Фиг. 89. Влияние последовательности сварки на прочность точек:

а — при сварке сетки по спирали; б — при сварке сетки рядами

усилия P — контакта между деталями в месте их сварки не будет, весь ток потечет через шунт (сварка в этом случае совершенно невозможна).

Усилие P_0 увеличивается с увеличением предела текучести свариваемого материала, с увеличением толщины деталей и их жесткости, с уменьшением расстояния между соседними точками и с увеличением зазора между деталями. Особенно быстро растет P_0 при увеличении толщины деталей (например, при сварке малоуглеродистой стали толщиной 1—1,5 мм $P_0 \approx 20 \div 25$ кг; при толщине 3 мм — около 100 кг и при толщине 6 мм — 350—400 кг). Чем меньше отношение $\frac{P_0}{P}$, тем меньше колеблется P_k и тем устойчивее должны быть результаты сварки (прочность точки).

Из-за очень быстрого роста P_0 отношение $\frac{P_0}{P}$ с увеличением толщины металла повышается. При толщине 2 мм $\frac{P_0}{P} = 0,1 \div 0,2$; при толщине 6—8 мм это отношение растет до 0,3—0,5. Этим отчасти объясняется нестабильность качества при сварке деталей большой толщины.

§ 5. КОНСТРУКТИВНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ УЗЛОВ ПРИ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКЕ

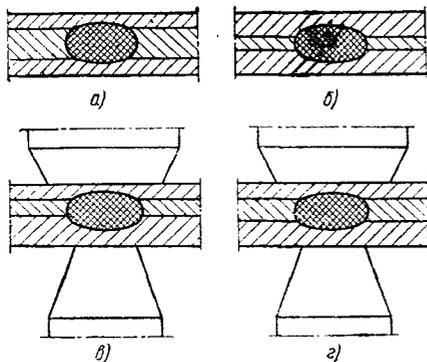
Ряд особенностей точечной сварки связан с природой этого процесса и относительно мало зависит от рода свариваемого материала. Эти особенности определяют конструктивное оформление узлов.

Число одновременно свариваемых деталей в ответственных соединениях по возможности не должно превышать двух, так как с увеличением их числа сильнее сказывается шунтирование и прочность точек становится нестабильной. При односторонней сварке число свариваемых деталей всегда ограничивается двумя.

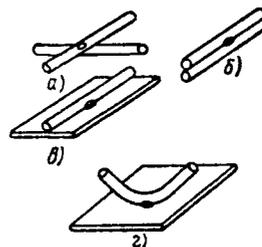
Сварка деталей неодинаковой толщины осуществляется без особых затруднений при отношении их толщин в пределах 1:3. При сварке двух деталей режим в основном определяется толщиной более тонкой детали; при этом несколько увеличивается сила тока или длительность его включения (режим сварки не следует назначать, исходя из средней толщины свариваемых деталей).

При одновременной сварке трех деталей неодинаковой толщины встречаются четыре случая: а) к толстой детали привариваются две тонкие (фиг. 90, а) — режим определяется меньшей толщиной при некотором повышении силы тока; б) тонкая деталь располагается между двумя толстыми (фиг. 90, б) — режим определяется большей толщиной при некотором понижении силы тока; в) две тонкие детали привариваются к одной толстой (фиг. 90, в) — режим определяется меньшей толщиной при небольшом увеличении тока; г) тонкая деталь приваривается к двум толстым (фиг. 90, г) — режим определяется большей толщиной; во избежание прожога тонкой детали прилегающий к ней электрод должен иметь увеличенную контактную поверхность.

Точечная сварка круглых стержней вкрест (фиг. 91, а) дает прекрасные результаты, так как точка касания деталей всегда лежит точно в их пересечении и усилие, действующее в контакте между ними, весьма постоянно. Вследствие ограниченной площади контакта между круглыми стержнями плотность тока велика и сварка осуществляется при относительно небольшой мощности. Сварка параллельных стержней (фиг. 91, б) труднее; площадь контакта больше, чем при сварке вкрест, и расположение этого контакта менее определено. Сказанное относится и к приварке круглого стержня к листу (фиг. 91, в). Очень удобна сварка изогнутого стержня с листом втавр, как показано на фиг. 91, г.



Фиг. 90. Сечение ядра точки при сварке трех деталей неодинаковой толщины.



Фиг. 91. Точечная сварка круглых стержней между собой и с листами.

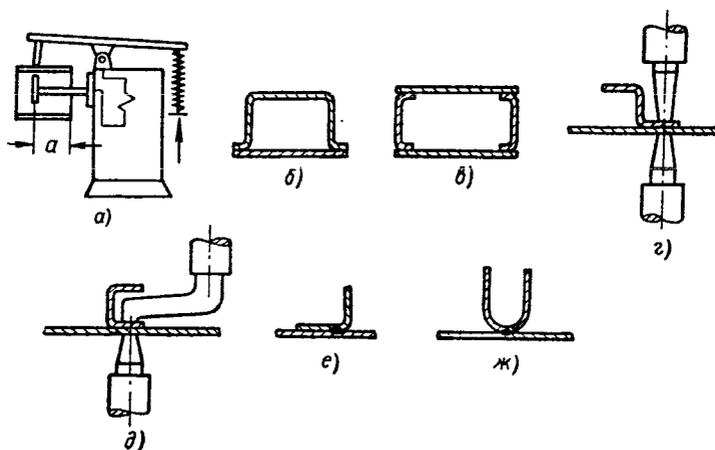
Размещение сварных точек определяется условиями шунтирования и беспрепятственной деформации. С увеличением толщины деталей увеличиваются минимальный допустимый шаг точек и минимальное расстояние от их центра до элементов, затрудняющих деформацию деталей. Данные по размещению точек при сварке конструкционных сталей приведены в табл. 11. При рациональном технологическом

Таблица 11

Минимальный рекомендуемый шаг точек и минимальные расстояния от центра точки до края детали и ребер в мм

Толщина одной детали	Минимальный шаг точек		Минимальное расстояние от центра точки до края детали в направлении, перпендикулярном действующему в соединении усилию	Минимальное расстояние от центра точки до ребер и отбортовок
	при сварке двух деталей	при сварке трех деталей		
1	15	20	6	8
2	25	30	9	12
3	30	40	10	18
4	40	50	12	25
6	60	80	15	30
8	80	120	20	40

процессе и указанных в табл. 11 шагах прочность точки в результате шунтирования снижается на 10—20% (при сварке двух деталей) и на 25—30% (при сварке трех деталей), оставаясь достаточно стабильной. Дальнейшее понижение шага возможно, но ведет к заметному снижению стабильности показателей прочности. При сварке нержавеющей и жаропрочных сталей с высоким сопротивлением предельный шаг точек может быть на 15—20% уменьшен.



Фиг. 92. К конструированию узлов, выполняемых точечной сваркой:

а — свариваемый узел в контуре машины; *б* — узел с внешней отбортовкой; *в* — закрытая коробка (менее целесообразна, чем *б*); *г* — ребро, привариваемое нормальными электродами; *д* — ребро, требующее специальной оснастки; *е* — точка размещена слишком близко к ребру; *ж* — точка размещена на закруглении малого диаметра (сварка узлов *е* и *ж* затруднена).

Конструктивные требования к узлам. Специальное оборудование позволяет успешно сваривать точками изделия очень сложной конфигурации. При использовании универсального оборудования и простейших приспособлений желательно, конструируя узлы, руководствоваться следующим:

а) сечение деталей и приспособлений из магнитной стали, вводимых (на расстояние *а*) в контур машины (фиг. 92, *а*), должно быть минимальным и не должно сильно изменяться в процессе сварки (магнитная сталь в контуре понижает сварочный ток и может приводить к непровару точек; см. § 1 гл. IX); в связи с этим конструкция с отбортовкой (фиг. 92, *б*) целесообразнее коробчатой конструкции (фиг. 92, *в*), надеваемой при сварке на плечо машины (по схеме фиг. 92, *а*);

б) все свариваемые точки по возможности должны допускать применение нормальных электродов с интенсивным водяным охлаждением (соединение по фиг. 92, *г* целесообразнее соединения по фиг. 92, *д*);

в) желательно предусматривать возможность сварки всех точек в узле в любой последовательности, что облегчает борьбу со сварочными деформациями;

г) точки не должны размещаться слишком близко к краю деталей (на расстоянии менее $1,5d_m$; d_m — диаметр ядра точки), так как при этом нагретый металл выдавливается в сторону, что сопровождается значительным вмятием и ослаблением детали;

д) сварные точки не должны располагаться в трудно деформируемых местах (вблизи ребер — фиг. 92, *е*, на закруглениях малого радиуса — фиг. 92, *ж*).

§ 6. ОБЩИЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ

Технологический процесс как точечной, так и других способов сварки должен обеспечивать: а) заданную прочность соединения при стабильных ее показателях для отдельных точек; б) минимальные деформации сваренного узла и в) высокую производительность как самой сварки, так и связанных с ней вспомогательных операций.

Обычно технологический процесс точечной сварки складывается из трех операций: подготовки деталей к сварке, их сборки и сварки. В отдельных случаях добавляются операции правки, термической и механической обработки (иногда эти операции чередуются с основными сварочными операциями).

Заготовка и сборка деталей могут существенно влиять на качество сварного узла. Неточная заготовка и сборка деталей, естественно, ведут к неправильной геометрической форме сварного изделия и к снижению производительности труда; большие зазоры между деталями затрудняют качественное выполнение сварки и могут приводить к увеличению сварочных деформаций. В связи с этим зазоры между собранными деталями не должны превышать 0,5—0,8 мм (при жестких штампованных деталях небольшого размера допустимый зазор иногда уменьшается до 0,1—0,2 мм). Частая причина недопустимых зазоров при сборке — неперпендикулярность отбортовки (фиг. 93, *а*) и несовпадение радиусов на закруглениях (фиг. 93, *б*).

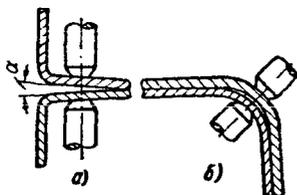
Очистка деталей перед сваркой может быть общей или местной (очищается только зона расположения сварных точек). В обоих случаях очищается, как правило, обе поверхности деталей. Способ очистки зависит от вида свариваемого материала, размеров деталей и их количества. Способы очистки рассматриваются в последующих параграфах.

Точность узла при точечной сварке обеспечивается: а) правильным изготовлением и сборкой деталей; б) отсутствием взаимного смещения деталей в процессе их сварки и в) отсутствием значительных сварочных деформаций.

Точная сборка деталей достигается применением соответствующих приспособлений.

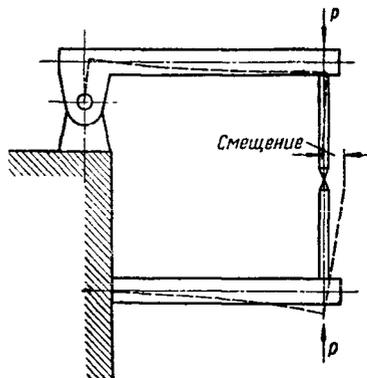
Взаимное смещение деталей может возникать при точечной сварке вследствие смещения электродов (из-за деформации плеч машины): Если контактные поверхности верхнего и нижнего электродов соосны до приложения к электродам усилия (это положение показано на фиг. 94 сплошными линиями), то после приложения усилия P нижний электрод

вместе с нижним плечом машины опустится, а верхний, следуя за ним, сместится, как показано пунктиром. Так как между электродами и свариваемыми деталями развивается значительная сила трения, детали могут также сместиться относительно друг друга. Для того, чтобы избежать этого, первые точки в узле (прихватки) должны обязательно свариваться в приспособлении, удерживающем детали в требуемом положении.



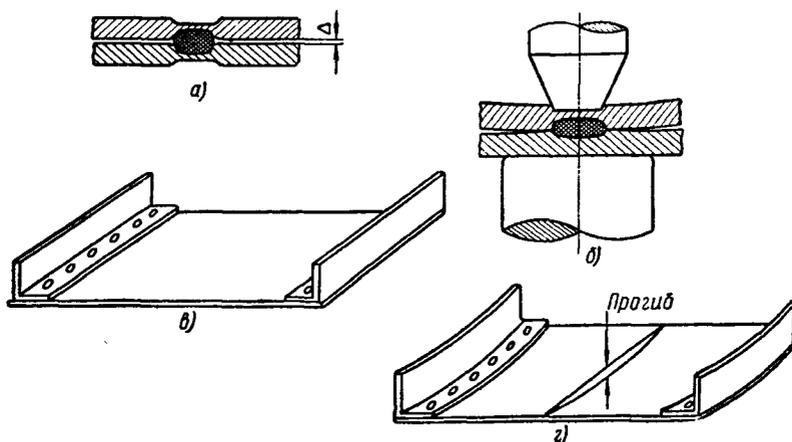
Фиг. 93. Дефекты изготовления и сборки деталей перед точечной сваркой:

a — неправильная отбортовка; *b* — неодинаковые радиусы закруглений.



Фиг. 94. Смещение контактных поверхностей электродов при деформации плеч машины.

нии. Если специальные приспособления не применяются, то детали вначале должны удерживаться плоскогубцами (при мелких деталях) или струбцинами.



Фиг. 95. Деформации при точечной сварке:

a — местная деформация в зоне сварной точки; *b* — сварка с гладкой лицевой поверхностью; *в* и *г* — элемент каркаса с листовой обшивкой до и после точечной сварки.

Деформации при точечной сварке бывают местными и общими. Местная деформация происходит в непосредственной близости к свариваемой точке. Она обычно связана с излишним нагревом зоны сварки, ведущим к появлению зазора Δ между деталями (фиг. 95, *a*) и

глубоким вмятиям — поверхность деталей приобретает вид стеганого одеяла.

Иногда по условиям эксплуатации (обтекаемые узлы самолета) или для улучшения внешнего вида конструкции (обшивка кузова автомобиля) на лицевой поверхности узла не допускается вмятия. В этом случае с лицевой поверхности при сварке применяется электрод большого диаметра. При этом ядро точки несколько смещается в сторону меньшего электрода (фиг. 95, б), что приводит к большей деформации детали со стороны меньшего электрода.

Общая деформация деталей при точечной сварке вызывается обычно их неодинаковым нагревом. Например, при сварке листа с угольником (фиг. 95, в) последний вследствие относительно небольшого сечения нагревается значительно сильнее листа. В результате этого при остывании узел деформируется, как схематически показано на фиг. 95, г. При точечной сварке крупных и не особенно жестких узлов (например, обшивки пассажирского вагона) деформации могут быть очень значительными и борьба с ними — одна из главных задач технолога.

Уменьшение сварочных деформаций достигается уменьшением длительности нагрева (применением жестких режимов сварки); рациональной последовательностью сварки отдельных точек; надежным закреплением деталей при сварке и искусственным охлаждением зоны сварки (например, подачей в эту зону струи сжатого воздуха с распыленной водой — способ МВТУ).

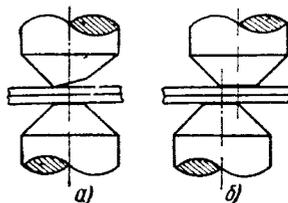
Последовательность сварки отдельных точек в узле устанавливается так, чтобы: а) сварить все точки при минимальном шунтировании тока; б) начиная сварку узла с прихваток, разместить их в наиболее ответственных местах конструкции и на трудно деформируемых участках (на закруглениях, вблизи ребер и т. п.); в) сварочные деформации узла были наименьшими.

После прихватки точки в соединении желательно сваривать подряд. При большой протяженности соединения сварка ведется от его середины к концам.

Для получения сварных точек стабильной прочности, помимо строгого соблюдения постоянства основных параметров режима сварки, требуется правильная установка свариваемого узла между электродами. Перекос (фиг. 96, а) и смещение электродов (фиг. 96, б) приводят к прожогам и другим дефектам сварки.

§ 7. СВАРКА МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ ТОЛЩИНЫ

В промышленных условиях серийное оборудование используется для точечной сварки малоуглеродистой стали толщиной до 6 мм. Сварка стали большей толщины требует применения специального оборудования и особых технологических приемов.



Фиг. 96. Неправильное прилегание (а) и смещение (б) электродов при точечной сварке.

Точечной сварке подвергается как горячекатанная, так и холоднокатанная сталь. Горячекатанная сталь имеет слой окалины (иногда также и ржавчины) и перед точечной сваркой очищается травлением (в нагретой 10% серной кислоте с нейтрализацией в растворе NaOH и промывкой в горячей воде), пескоструйванием (с последующей обдувкой струей сжатого воздуха) или механически (наждачным кругом, напильником, шкуркой). Лучшие результаты дает травление. Очистка стальной проволочной щеткой не полностью удаляет окалину и не является полноценной.

Холоднокатанная сталь свободна от окалины и специальной очистки не требует (если в процессе транспортировки и хранения она не покрывается ржавчиной и не загрязняется). Тонкая масляная пленка выдавливается электродами и не препятствует точечной сварке.

Малоуглеродистая сталь толщиной до 6 мм обычно сваривается по простейшему циклу: сварочный ток протекает непрерывно, и усилие на электродах остается постоянным на протяжении всего процесса (см. фиг. 81, а).

Малоуглеродистая сталь относительно мало чувствительна к термическому воздействию сварки. При толщине до 6 мм ее можно хорошо сваривать как с большой скоростью нагрева (жесткий режим), так и с малой скоростью нагрева (мягкий режим). В первом случае требуются машины большой мощности, но достигается высокая производительность труда, уменьшается расход электроэнергии и уменьшаются деформации конструкции. В крупносерийном и массовом производстве увеличение мощности оборудования, как правило, окупается.

Длительность сварки стали толщиной до 6 мм на жестких режимах лежит в пределах 0,15—1,5 сек. При использовании серийного оборудования нецелесообразно уменьшать $t_{св}$ ниже 0,2 сек., так как при очень малых $t_{св}$ незначительные колебания в величине $t_{св}$ могут приводить к заметным колебаниям прочности точки.

Необходимый ток зависит от толщины деталей, длительности его включения, от приложенного к электродам усилия и размера их контактной поверхности. Интенсивность нагрева при точечной сварке приблизительно пропорциональна квадрату плотности тока

$$j = \frac{I}{F},$$

где F — площадь контактной поверхности электрода. Необходимая плотность тока растет с увеличением приложенного усилия и с уменьшением длительности нагрева. Чрезмерное увеличение j ведет к выплескам и быстрому износу электродов; малая j замедляет процесс и ухудшает провар. Медленный нагрев способствует значительному росту зерна вокруг ядра точки.

При жестких режимах [$t_{св} = (0,1 \div 0,2) \delta$], где δ — толщина более тонкой детали] плотность тока обычно лежит в пределах 120—360 а/мм² (j растет с уменьшением толщины деталей). Сварка на мягких режимах обычно производится при $j = 80 \div 160$ а/мм², причем $t_{св}$ составляет 0,8—3 сек. для деталей толщиной 1—3 мм.

Как указывалось выше, усилие, которое должно быть приложено к электродам, зависит от толщины свариваемых деталей и от длительности нагрева. При сварке горячекатанной малоуглеродистой стали толщиной до 6 мм $P = (60 - 200) \delta$, где δ — толщина одной детали в мм и P — усилие в кг (меньший коэффициент соответствует сварке более тонких деталей). При сварке горячекатанной стали удельное давление на электроды характеризуется следующими цифрами:

- 2—3 кг/мм² при сварке на мягком режиме стали толщиной 0,5—3 мм;
- 4—8 кг/мм² при сварке на мягком режиме стали толщиной 4—6 мм;
- 2—5 кг/мм² при сварке на жестком режиме стали толщиной 0,5—2 мм;
- 6—10 кг/мм² при сварке на жестком режиме стали толщиной 3—6 мм.

Меньшие цифры соответствуют меньшей толщине металла. При сварке наклепанной холоднокатанной стали желательно повышать удельные давления на 20—30%.

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

$$d_3 = 2\delta + 3 \text{ мм.} \quad (47)$$

где δ — толщина более тонкой из свариваемых деталей в мм.

При нормальной эксплуатации увеличение диаметра контактной поверхности электрода в результате его износа не должно превышать 15—20%.

Сферическая контактная поверхность электродов при сварке стали обычно имеет радиус 50—75 мм.

При сварке малоуглеродистой стали электроды изготавливаются из меди или ее сплавов повышенной твердости (для уменьшения износа), обладающих электропроводностью не ниже 75% электропроводности чистой меди (см. § 4 гл. XI).

Фактический размер сварной точки (диаметр или площадь сечения ее ядра) зависит от принятого технологического режима сварки. При рациональном технологическом процессе диаметр ядра составляет (0,9—1,3) d_3 , где d_3 — диаметр контактной поверхности электрода, определяемый по формуле (47). Предел прочности при испытании сварной точки на срез для малоуглеродистой стали составляет в среднем 30 кг/мм², уменьшаясь с увеличением диаметра точки.

В табл. 12 и 13 приведены ориентировочные режимы точечной сварки малоуглеродистой стали (жесткие и мягкие), соответствующие применению машин автоматического и неавтоматического действия. При сварке деталей неодинаковой толщины режим определяется толщиной более тонкой детали (ток повышается на 10—25%). Так же приходится поступать при одновременной сварке трех деталей.

Макроструктура точки имеет следующие зоны: литое ядро 1 дендритного строения (фиг. 97, а), окружающую ядро оболочку крупного зерна 2, зону нормализованного мелкого зерна 3, постепенно переходящую к структуре основного металла 4. При жестком режиме

Таблица 12

Ориентировочные режимы точечной сварки малоуглеродистой стали на серийных автоматических машинах (жесткие режимы)

Толщина каждой детали в мм	Диаметр контактной поверхности электрода в мм	Приложенное усилие к электродам в кг	Длительность включения сварочного тока в сек.	Ориентировочная сила тока в сварочной цепи в а	Тип машины
0,5	5—6	30—40	0,20—0,30	4 000—5 000	МТМ-50
1,0	5—6	80—120	0,20—0,35	6 000—7 000	МТМ-50
1,5	6—8	120—160	0,25—0,35	7 000—8 000	МТМ-50; МТП-75
2,2	8—10	180—300	0,25—0,35	9 000—10 000	МТП-75; МТМ-75
3,0	10—12	500—600	0,6—1,0	12 000—16 000	МТП-100
4,0	12—14	600—800	0,8—1,1	14 000—18 000	МТП-100; МТП-150
5,0	12—14	700—900	0,9—1,2	17 000—22 000	МТП-150; МТП-200
6,0	14—16	900—1200	1,1—1,5	20 000—25 000	МТП-200

Таблица 13

Ориентировочные режимы точечной сварки малоуглеродистой стали на машинах неавтоматического действия (мягкие режимы)

Толщина каждой детали в мм	Диаметр контактной поверхности электродов в мм	Усилие, приложенное к электродам, в кг	Длительность включения сварочного тока в сек.	Ориентировочная сила тока в сварочной цепи в а
1	6—7	80—100	0,6—1,0	4000—5000
1,5	7—9	100—140	0,8—1,2	5000—6000
2	8—10	140—180	1,5—2,0	6000—7500
3	9—11	180—250	2,0—3,0	7500—9000

сварки зона крупного зерна невелика; при мягком режиме она заметно расширяется, что видно из сравнения фиг. 97, а и б. (На фиг. 97, б видна структура точки, сваренной на мягком режиме.)

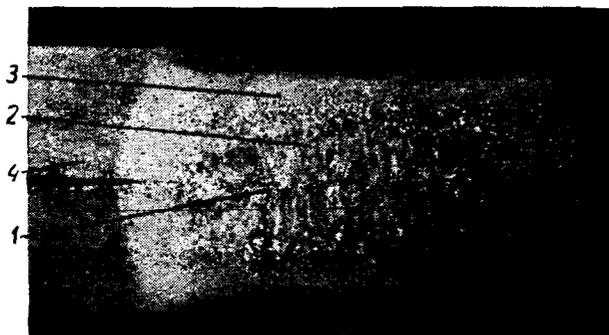
При длительном нагреве ($t_{св} \geq 3—4$ сек.) возможна видманштеттова структура, резко снижающая пластические свойства стали.

На фиг. 98 схематически показаны в разрезе контуры ядра точки при сварке двух и трех деталей одинаковой или разной толщины. При сварке двух деталей одинаковой толщины электродами равного диаметра (фиг. 98, а) ядро имеет симметричную чечевицеобразную форму. Глубина проплавления каждой детали (h) нормально лежит в пределах $(0,5—0,75) \delta$. Неправильная форма ядра (фиг. 98, б) указывает на недостаточное усилие на электродах или на их неправильную установку. При использовании одного электрода большого диаметра (второй электрод нормальный) на лицевой поверхности отсутствует вмятие, ядро смещено в сторону электрода малого диаметра и проплавление несимметрично (см. фиг. 95, б).

При одновременной сварке трех деталей примерно одинаковой толщины, как правило, образуется общее ядро (фиг. 98, в). Прочность



а)

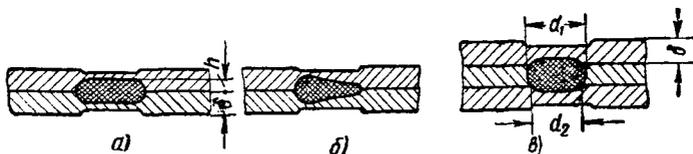


б)

Фиг. 97. Типовая макроструктура точки (С. С. Астафьев) при сварке стали перлитного класса ($\times 3$):

а - сварка на жестком режиме (толщина деталей 4 мм, длительность нагрева 0,6 сек); б - сварка на мягком режиме (толщина деталей 5 мм, $t_{\text{св}}$ = 4,8 сек.).

такой точки определяется не наибольшим диаметром ядра d_1 , а меньшим и не постоянным по величине диаметром d_2 . Это одна из причин отно-



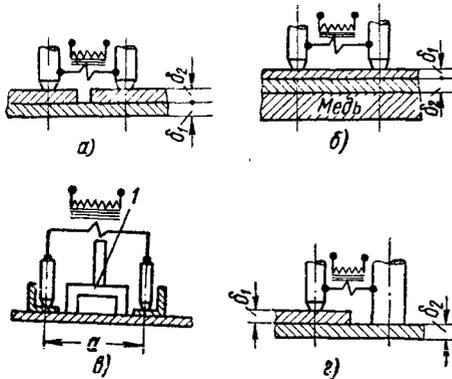
Фиг. 98. Сечение ядра точки при сварке двух и трех деталей.

сительно малой стабильности результатов испытания точек, полученных при сварке трех деталей.

В промышленности часто приходится сваривать малоуглеродистую сталь со специальными защитными покрытиями (цинком, оловом,

свинцом, никелем, кадмием, алюминием, хромом и т. д.). При этом необходимо не только получить точки удовлетворительной прочности, но и по возможности не повредить защитные покрытия. Относительно лучше сваривается сталь, покрытая свинцом и цинком. Удовлетворительно свариваются хромированная, кадмированная и покрытая алюминием сталь и белая жель.

Сварка сталей с покрытиями производится на жестких режимах (во избежание большого повреждения покрытия зона разогрева должна быть минимальной). Длительность сварки лежит в пределах 0,1—0,2 сек; усилие на электродах повышается на 15—25% по сравнению со



Фиг. 99. Различные варианты односторонней сварки.

сваркой стали той же толщины, но без покрытия. Для уменьшения зоны разогрева может применяться охлаждение деталей водой во время сварки.

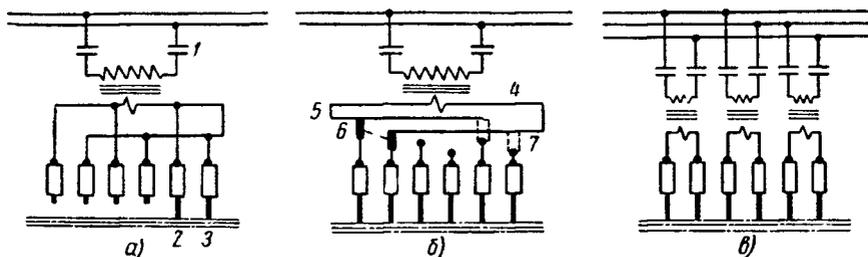
При изготовлении узлов из малоуглеродистой стали часто применяются различные способы односторонней (одно- и двухточечной) сварки. Односторонняя сварка обладает рядом преимуществ по сравнению с обычной двухсторонней сваркой. Главные из них: размещение сварочной машины по одну сторону от изделия, что позволяет сравнительно легко сваривать точками конструкции очень больших размеров; малые размеры токоподводящего контура сварочной машины, что заметно уменьшает необходимую мощность (см. § 1 гл. IX); высокая производительность (при многоточечной сварке). Недостатки односторонней сварки: относительная сложность и неуниверсальность оборудования.

Применяются две основные разновидности односторонней сварки: сварка без шунтирования (фиг. 99, а) и с шунтированием (фиг. 99, б). В первом случае весь ток протекает через зону сварки (за исключением части тока, ответвляющейся через смежные точки и случайные контакты); во втором случае сварка осуществляется только частью тока, шунтирующей через нижнюю деталь и медную подкладку (если она предусмотрена технологическим процессом). Сварка без шунтирования дает более стабильное качество соединения. Она применяется, так же как и все остальные виды односторонней сварки, при изготовлении громоздких изделий. При большом расстоянии a между привариваемыми деталями (фиг. 99, в), например при сварке элементов каркаса с листовой обшивкой, во избежание нежелательного нагрева и коробления листа в промежутке между ребрами применяется специальная медная перемычка 1 , прижимаемая к изделию одновременно с электродами. При сварке нахлесточных соединений в крупных изделиях может успешно применяться односторонняя одноточечная сварка (фиг. 99, г).

Односторонняя сварка с шунтированием без специальной медной подкладки практически осуществима с приемлемыми результатами только при отношении толщин нижней и верхней деталей не менее 3:1. В остальных случаях применение подкладки обязательно.

Толщина деталей из малоуглеродистой стали, свариваемых односторонней сваркой, обычно ограничивается 2,5—3 мм.

Большое применение в массовом производстве находит односторонняя многоточечная сварка. Стабильное качество сварки обеспечивается только в том случае, если к сварочному трансформатору одновременно присоединяется не более двух электродов, осуществляющих сварку. При этом применяются три принципиально отличающиеся схемы: питание от одного трансформатора с переключением в пер-

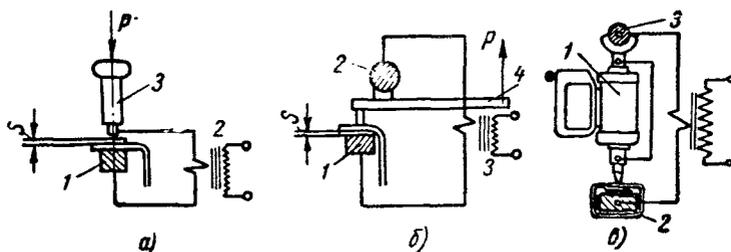


Фиг. 100. Варианты многоточечной сварки.

вичной цепи машины (фиг. 100 а) — каждая пара электродов поочередно прижимается к изделию, и при замыкании выключателем 1 первичной цепи происходит сварка двух точек 2 и 3 (преимущества — отсутствие переключений в сварочной цепи, в которой протекает значительный ток; недостатки — сложное управление механизмами сжатия электродов и значительная деформация изделия во время сварки); питание от одного трансформатора с переключением в сварочной цепи машины (фиг. 100, б) — все электроды одновременно прижимаются к изделию, но поочередно подключаются к общим шинам 4 и 5 переключателем, перемещающимся из положения б в положение 7 (преимущества — надежное зажатие свариваемого изделия во многих точках, что предупреждает его деформацию, и простота механизмов сжатия; недостатки — необходимость систематического ухода за переключателем, пропускающим значительный сварочный ток); питание каждой пары электродов от отдельного трансформатора (фиг. 100, в) — все электроды одновременно прижимаются к изделию; все точки свариваются одновременно или несколькими последовательными группами (преимущества — каждый трансформатор располагается на минимальном расстоянии от электродов, к которым он присоединен, в связи с чем резко уменьшаются его мощность и размеры; режим сварки каждой пары точек индивидуально регулируется; все точки могут свариваться одновременно, что повышает производительность процесса; одновременное зажатие изделия всеми электродами

значительно уменьшает его деформацию; наличие нескольких одновременно включаемых трансформаторов обеспечивает равномерную загрузку трехфазной сети; недостатки — большая стоимость трансформаторов. Способ индивидуального питания — наиболее прогрессивный.

При изготовлении сложных пространственных конструкций из тонкой стали часто применяется одноэлектродная (пистолетная и рычажная) сварка (фиг. 101, а и б). При пистолетной сварке изделие собирается в кондукторе, в котором под свариваемыми элементами располагаются жесткие медные шины 1, соединяемые с трансформатором 2. Второй полюс трансформатора соединяется гибким проводом со сварочным пистолетом 3. Пистолет прижимается к изделию в месте сварки вручную (усилием $P=25 \div 30$ кг), после чего включается



Фиг. 101. Точечная сварка с помощью пистолета (а), рычага (б) и домкрата (в).

ток и производится сварка. Пистолет удобен при сварке в малодоступных местах и широко применяется в автомобильной промышленности.

Максимальная толщина свариваемых деталей ограничивается развиваемым вручную усилием и не должна превышать 0,8 мм (при сварке мягкой стали с содержанием до 0,1% С).

При сварке стали толщиной 1—1,5 мм успешно используется рычажная сварка (фиг. 101, б). Как и при пистолетной сварке, изделие собирается в специальном кондукторе на медных шинах 1. Вдоль этих шин идут наружные токоподводящие шины 2. Те и другие соединяются с трансформатором 3. Сварочная цепь замыкается рычагом 4, который вручную легко передвигается и устанавливается в любом положении вдоль шины. Усилие на электродах создается нажатием на конец рычага, после чего включается ток и производится сварка очередной точки. В современной практике рычаг часто заменяется пневматическим домкратом. Домкрат 1 устанавливается между шинами 2 и 3 (фиг. 101, в). Необходимое для сварки усилие создается сжатым воздухом, поступающим в цилиндр домкрата. Величина этого усилия может быть вполне достаточной для сварки стали толщиной до 2 мм. После сжатия деталей включается ток и производится сварка. При сварке деталей большей толщины настолько увеличиваются размеры домкрата, что затрудняется его использование как переносного устройства.

§ 8. СВАРКА НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Углеродистая сталь с содержанием более $0,2\%$ С и большинство легированных конструкционных сталей в результате нагрева и быстрого охлаждения при точечной сварке образуют сварные точки, отличающиеся значительной хрупкостью. Во время сварки некоторых сталей на жестких режимах в зоне точки могут появляться трещины. В настоящее время при сварке легированных сталей, восприимчивых к закалке, применяются три основных варианта технологического процесса:

а) сварка на мягком режиме, предупреждающем образование трещин, с последующей общей термической обработкой сварного узла;

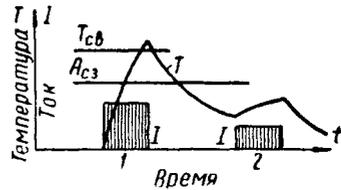
б) сварка на очень мягком режиме без последующей термической обработки;

в) сварка на жестком режиме с непосредственно следующей за ней термической обработкой каждой сваренной точки между электродами точечной машины.

Общая термическая обработка сварного узла обеспечивает наиболее однородную структуру металла. Целесообразность ее применения ограничивается жесткими узлами относительно небольшого размера.

Сварка на мягких режимах без последующей термической обработки во многих случаях дает удовлетворительные результаты. Ее недостатки — низкая производительность, значительные сварочные деформации и рост зерна в зоне сварной точки. Например, интенсивно закаливающаяся сталь марки 30ХГСА (сталь хромансиль с $0,30\%$ С) толщиной 1—2,5 мм может свариваться без образования трещин и без чрезмерной хрупкости при длительности сварочного нагрева, равной 2—3 сек., приложенном к электродам усилии $P = 150 \div 250$ кг и токе $I_2 = 6400 \div 7200$ а.

Идея точечной сварки с термической обработкой между электродами была впервые выдвинута в 1935 г. в СССР Н. В. Гевелингом. Наиболее целесообразный цикл термической обработки при точечной сварке: сварка — охлаждение между электродами — повторный нагрев (фиг. 102). В результате быстрого охлаждения стали в зоне сварки возможна закалка. При повторном нагреве в этой зоне осуществляется более или менее полный отпуск, вследствие чего твердость понижается, а пластические свойства металла повышаются. При нагреве электрическим током структурные превращения в стали идут очень быстро (см. гл. III), в связи с чем кратковременный повторный нагрев длительностью 0,1—3 сек. (в зависимости от толщины свариваемого материала) существенно влияет на структуру и механические свойства стали. Хрупкость сварной точки может характеризоваться отношением $\frac{P_{раз}}{P_{ср}}$, где $P_{раз}$ — разрушающее сварную точку усилие при ее испытании на разрыв и $P_{ср}$ — разрушающее усилие при испытании точки на срез. Чем меньше это отношение, тем больше хрупкость точки.



Фиг. 102. Схема точечной сварки с последующей термической обработкой между электродами точечной машины:

1 — сварка; 2 — отпуск.

Термическая обработка сварной точки между электродами может существенно повысить отношение $\frac{P_{раз}}{P_{св}}$. Например, при сварке листов углеродистой стали с содержанием $0,45\%$ С толщиной 1 мм без термической обработки ($t_{св}=0,1$ сек., $P=670$ кг) $P_{раз}=35 \div 55$ кг, $P_{ср}=400$ кг и $P_{раз} : P_{ср}=0,11$; если после паузы длительностью 0,25 сек. повторно включался ток в течение 0,1 сек., то $P_{раз}$ увеличивалось до 360—410 кг, $P_{ср}$ — до 1160—1200 кг и отношение $\frac{P_{раз}}{P_{ср}}$ достигало 0,33. Максимальная твердость в зоне сварки при этом снижалась с 750 H_B до 400 H_B . Термическая обработка между электродами эффективна и при точечной сварке низколегированной стали. При сварке стали НЛ-2 толщиной 4 мм, содержащей $0,11\%$ С; $0,68\%$ Mn; $0,50\%$ Si; $0,49\%$ Cr; $0,68\%$ Ni; $0,20\%$ Cu (С. С. Астафьев) без термической обработки ($t_{св}=0,6$ сек., $I_2=17\ 000$ а, $P=1200$ кг, $d_s=11$ мм) $P_{раз}=1230$ кг и $\frac{P_{раз}}{P_{ср}}=0,20$. Введение после сварки термической обработки (пауза—3,5 сек., повторный нагрев—1,4 сек., ток при повторном нагреве—12 700 а) повысило $P_{раз}$ до 2200 кг и при неизменном значении $P_{ср}$ подняло отношение $\frac{P_{раз}}{P_{ср}}$ до 0,37. При этом твердость в зоне точки понизилась более чем на 50 единиц по Бринелю.

Для эффективной термической обработки между электродами необходимо, чтобы: а) пауза между сварочным и повторным нагревами была достаточной для понижения температуры в зоне сварки ниже точки мартенситного превращения стали, т. е. для закалки стали, и б) при повторном нагреве температура в зоне точки не превышала температуру перекристаллизации стали (во избежание повторной закалки стали при охлаждении после термической обработки от температуры, лежащей выше точки $A_{с3}$).

Для успешного выполнения сварки с термической обработкой в электродах обязательна автоматизация процесса, при которой основные его параметры изменяются в узких пределах. При значительных колебаниях этих параметров эффективность термической обработки резко понижается.

§ 9. ТОЧЕЧНАЯ СВАРКА СТАЛИ БОЛЬШОЙ ТОЛЩИНЫ

В настоящее время осваивается точечная сварка стали толщиной до 10—12 мм. Точечная сварка стали толщиной более 6—8 мм связана со следующими трудностями:

- а) из-за большой жесткости деталей получение надежного контакта между ними требует приложения к электродам очень больших усилий;
- б) очистка поверхности громоздких элементов перед их сваркой значительно удорожает изготовление конструкций;
- в) резко возрастает необходимое для уплотнения ядра ковочное давление;

г) из-за большого давления и длительного нагрева резко возрастает износ электродов;

д) введение при сварке в контур машины (см. фиг. 92, а) элементов большого сечения, неизбежное при изготовлении конструкций, ведет к понижению силы тока, ухудшению провара и нестабильности результатов сварки;

е) с увеличением толщины деталей растет степень шунтирования (отношение $\frac{I_{ш}}{I_{св}}$);

ж) требуется очень большая электрическая мощность машины.

Точечная сварка стали большой толщины может осуществляться импульсами тока промышленной (50 гц) или низкой (2,5—3 гц) частоты. Первый способ может быть использован при сварке стали толщиной до 8 мм. Для сварки стали этой толщины применяется 12—20 импульсов тока, каждый длительностью 0,25—0,35 сек., с паузами между ними 0,08—0,12 сек. Общая длительность нагрева достигает при этом (в зависимости от мощности оборудования и условий сварки — шунтирования, сечения стали, введенного в контур машины) 5—10 сек.

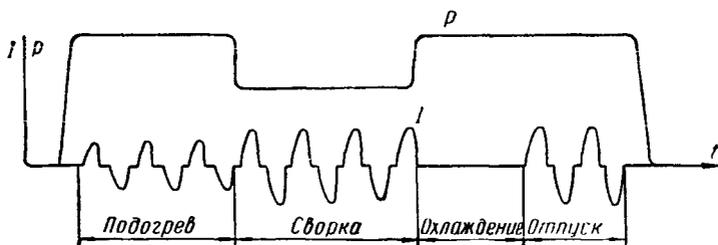
Сварка импульсами тока промышленной частоты производится на обычных точечных машинах мощностью 150 ква и выше, снабженных соответствующей автоматической аппаратурой (пульсационным регулятором времени).

Сварка импульсами тока промышленной частоты требует при равной суммарной длительности процесса применения больших токов, чем сварка с непрерывным его протеканием. Паузы способствуют некоторому охлаждению электродов, уменьшающему их износ. Это позволяет применять повышенные давления электродов и несколько улучшает стабильность результатов сварки.

Более эффективное решение проблемы точечной сварки стали большой толщины дает применение импульсов тока низкой частоты. Для их получения сварочный трансформатор подключается через специальный преобразователь частоты к выпрямительной установке, питающейся от трехфазной сети промышленной частоты. Вследствие низкой частоты сварочного тока индуктивное сопротивление машины, которое, как известно из электротехники, пропорционально частоте, очень мало, а коэффициент мощности ($\cos \varphi$) машины высок (выше 0,8). При этом введение в контур машины элементов большого сечения из магнитной стали практически не влияет на силу тока в сварочной цепи.

Предварительное сжатие деталей и подогрев небольшим током облегчают сварку стали, покрытой окалиной (при подогреве окалина разрушается, не вызывая значительного перегрева контактной поверхности электродов, что уменьшает их износ; большое предварительное давление электродов облегчает механическое разрушение пленки окалины и создание необходимого для протекания тока электрического контакта). В машинах низкой частоты обычно применяется увеличенное ковочное давление и возможна последующая термическая обработка сваренной точки, желательная при сварке низколегированных сталей. При этом полный цикл сварки имеет вид, показанный на фиг. 103.

Режим точечной сварки малоуглеродистой стали толщиной 12 мм характеризуется следующими параметрами: длительность включения сварочного тока 10—16 сек. (в зависимости от степени шунтирования), предварительное и ковочное усилие на электродах 7500 кг, усилие в момент протекания сварочного тока 5000 кг, длительность предварительного сжатия деталей и подогрева 3 сек., длительность приложения ковочного давления 2,5 сек., сила тока в сварочной цепи—около 40 000 а, радиус сферической контактной поверхности электрода 50 мм, общая длительность сварки одной точки 20—24 сек. Средняя прочность



Фиг. 103. Диаграмма изменения тока и усилия на электродах при сварке стали большой толщины с подогревом и термической обработкой.

точки достигает 20 000 кг. Мощность, потребляемая при сварке, не превышает (вследствие очень высокого коэффициента мощности) 200 ква и в силу особенностей схемы питания равномерно распределяется между всеми фазами трехфазной сети.

§ 10. ТОЧЕЧНАЯ СВАРКА АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ И ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

Точечная сварка нержавеющей и жаропрочных сталей аустенитного класса получила широкое промышленное применение. Сварка сталей типа X18N9 (18% Cr и 9% Ni) дает лучшие результаты при жестких режимах (длительность нагрева для листов толщиной 0,5—2,5 мм лежит в пределах 0,08—0,3 сек.). При сварке сталей, не содержащих стабилизирующих присадок (титана или ниобия), малая длительность нагрева обязательна, так как она предупреждает выпадение карбидов хрома и межкристаллитную коррозию (см. § 3 гл. III). Применение жестких режимов очень желательно и при сварке сталей, обычно используемых в конструкциях в наклепанном состоянии (холоднокатанная сталь), так как при кратковременном нагреве уменьшается зона разупрочнения металла. Помимо этого, как указывалось выше, при жестких режимах заметно уменьшаются сварочные деформации.

В связи с высокой жаропрочностью нержавеющей сталей они свариваются при относительно высоком удельном давлении на электродах (около 15 кг/мм²). Вследствие низкой электропроводности нержавеющей сталей аустенитного класса ток при их сварке на 30—40% ниже, чем при сварке с той же длительностью нагрева деталей из малоуглеро-

дистой стали одинаковой толщины. Высокое удельное давление требует применения электродных сплавов высокой твердости. В табл. 14 приведены ориентировочные режимы точечной сварки нержавеющей стали типа X18H9. Эти режимы могут быть реализованы на машинах относительно небольшой мощности (до 25 *кВа*), снабженных точно действующими регуляторами длительности включения сварочного тока (прерывателями тока) и развивающих на электродах усилие до 600 *кг*. Увеличение указанных в табл. 14 усилий на 80—100% при соответствующем увеличении тока на 75—90% может существенно повысить стабильность результатов сварки.

Таблица 14

Ориентировочные режимы точечной сварки стали типа X18H9

Толщина каждой детали в <i>мм</i>	Диаметр контактной поверхности электродов в <i>мм</i>	Усилие, приложенное к электродам, в <i>кг</i>	Длительность включения сварочного тока в сек.	Ориентировочная сила тока в сварочной цепи в <i>а</i>
0,2	2,5—3	50—80	0,02—0,06	2200—2800
0,5	4—5	100—150	0,04—0,08	3200—3800
0,8	5—6	180—250	0,08—0,12	4000—4800
1,0	5—6	250—350	0,10—0,16	4400—5600
1,5	7—8	400—550	0,16—0,24	5500—7500
2,0	8—10	500—650	0,20—0,30	6500—8500

Точечная сварка аустенитных сталей с повышенным содержанием легирующих элементов (например, стали типа X25H20) производится на более мягких режимах, чем сварка стали типа X18H9, вследствие того, что при очень быстром нагреве стали X25H20 в ядре точки образуются радиальные трещины и значительная рыхлость. Основные параметры режима точечной сварки стали X25H20 приведены в табл. 15. Эти режимы почти без изменений применяются при сварке специальных хромоникелевых жаропрочных сплавов (например, типа нихром).

Таблица 15

Ориентировочные режимы точечной сварки стали типа X25H20

Толщина каждой детали в <i>мм</i>	Диаметр контактной поверхности электродов в <i>мм</i>	Усилие, приложенное к электродам, в <i>кг</i>	Длительность включения сварочного тока в сек.	Ориентировочная сила тока в сварочной цепи в <i>а</i>
0,8	5—6	120—200	0,5—0,7	3500—4500
1,0	6—7	250—350	0,9—1,1	4500—5500
1,5	6—7	350—450	1,1—1,3	5500—7000

Прочность точки на срез при комнатной температуре для сталей аустенитного класса и жаропрочных сплавов толщиной 0,8—1,2 *мм*

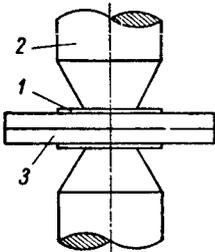
лежит в пределах 400—1000 кг. Сварные точки при комнатной температуре обладают высокой пластичностью, которая характеризуется отношением $\frac{P_{раз}}{P_{ср}}$, лежащим в пределах 0,7—1,0. При температуре 800° $P_{ср}$ понижается в 3—5 раз, а $P_{раз}$ — до 10 раз, в связи с чем отношение $\frac{P_{раз}}{P_{ср}}$ понижается до 0,25—0,45.

Хромоникелевые аустенитные стали удовлетворительно свариваются с малоуглеродистой сталью. Вследствие относительно высокого удельного сопротивления аустенитной стали ядро образуется в основном за счет проплавления этой стали. Химический состав и свойства металла в ядре определяются степенью перемешивания обеих свариваемых сталей при образовании точки.

§ 11. СВАРКА ЛЕГКИХ СПЛАВОВ

К этой группе сплавов относятся алюминиевые и магниевые сплавы, широко применяемые в современном самолетостроении.

Чистый алюминий обладает высокой электропроводностью и относительно трудно поддается точечной сварке, которая сопровождается перегревом контакта между электродом и деталью и частичным их свариванием. В результате этого, с одной стороны, частицы алюминия прилипают к поверхности электродов, чем вызывают их быстрый износ, и, с другой стороны, частицы меди прилипают к поверхности алюминиевых деталей, образуя сплав медь — алюминий, обладающий очень низкой коррозионной стойкостью (дуралюмин, являющийся таким сплавом, во избежание быстрой коррозии всегда покрывается тонким защитным слоем чистого алюминия). Точечная сварка алюминия может быть несколько облегчена применением теплоизолирующих прокладок 1 между электродами 2 и алюминиевыми деталями 3 (фиг. 104). Эти прокладки не привариваются к деталям; они уменьшают теплоотвод в электроды, позволяют производить сварку при относительно малой плотности тока без значительного износа электродов.



Фиг. 104. Схема точечной сварки с теплоизолирующими прокладками.
(Ф. И. Кислюк.)

Очень большое применение в промышленности получила точечная сварка термически и механически упрочняемых алюминиевых сплавов (дуралюмин, сплав АМц и др.). Свойства этих сплавов были кратко рассмотрены в § 4 гл. III.

При точечной сварке алюминиевых сплавов очень важно, чтобы пленка Al_2O_3 , всегда присутствующая на поверхности деталей, имела небольшое и по возможности постоянное сопротивление (порядка 100—300 мком при сварке на машинах переменного тока и меньше 100 мком при использовании запасенной энергии). Электрическое сопротивление естественной окисной пленки велико и колеблется в очень широких

пределах, поэтому все детали из алюминиевых сплавов, как правило, перед сваркой подвергаются специальной очистке.

Удаление естественной пленки Al_2O_3 производится механическим или химическим путем. В первом случае применяется быстровращающаяся стальная щетка с проволокой диаметром не более 0,1 мм или мелкая наждачная бумага (№ 00 или 0). При этом необходимо следить за тем, чтобы на поверхности деталей оставался достаточный слой чистого алюминия. Механическая очистка производится только в местах расположения точек. Ее недостатки: большая трудоемкость, возможность повреждения защитного слоя и очень быстрое окисление очищенной поверхности. Последнее приводит к тому, что очень малое сопротивление (порядка 10 мком) немедленно после очистки деталей через 20—30 час. возрастает до 1000 мком и более. Это ведет к нестабильности результатов сварки, так как в производственных условиях трудно обеспечить проведение сварки сразу после очистки.

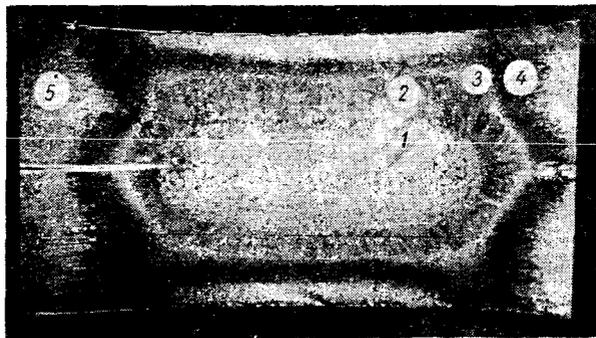
Лучшие результаты дает химическая очистка (травление), осуществляемая погружением деталей в специальные ванны (после предварительного их обезжиривания). Основные требования, которым должен удовлетворять травитель: а) энергичное растворение окислов при минимальном воздействии на основной, неокисленный сплав и б) образование на поверхности деталей после их травления новой пленки с умеренным электрическим сопротивлением, достаточно стойкой против воздействия кислорода; сопротивление этой пленки при хранении деталей перед сваркой не должно быстро увеличиваться. Хорошие результаты дает травление при температуре 17—25° в водном растворе концентрированной ортофосфорной кислоты (H_3PO_4) с добавкой 0,1—0,3% хромпика ($K_2Cr_2O_7$). Травление продолжается 10—15 мин., после чего детали просушиваются при комнатной температуре (30 мин.) или, лучше, горячим воздухом при $T = 70 \div 80^\circ$. Детали после такого травления могут храниться перед сваркой на машинах переменного тока до 3 суток, а при сварке запасенной энергией — до 24 час. Контроль качества травления производится измерением контактного сопротивления (специальным чувствительным прибором).

В результате нагрева при точечной сварке происходит местное разупрочнение сплава, распространяющееся на тем большую область, чем медленнее производился сварочный нагрев. Поэтому алюминиевые сплавы должны свариваться на относительно жестких режимах ($t_{св} = 0,1 \div 0,3$ сек.).

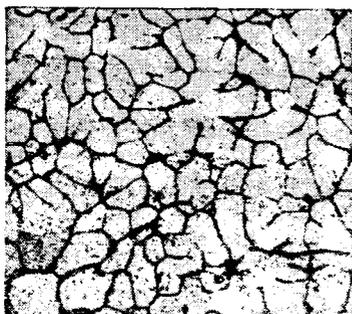
На фиг. 105, а показана макроструктура точки при сварке дуралюмина. В центре ядра 1 возможно равноосное мелкозернистое строение литого металла (фиг. 105, б); наружная часть ядра 2 имеет характерную столбчатую структуру (фиг. 105, в); ядро окружено узкой зоной 3 пережженного дуралюмина, в которой видны участки выпавшей хрупкой эвтектики (фиг. 105, з). Далее следует зона отжига 4, в которой произошло укрупнение зерна и выпали внутри зерен частицы $CuAl_2$ (фиг. 105, д) — здесь произошло полное разупрочнение сплава. Зона отжига переходит в основной металл 5, представляющий собой деформированные зерна твердого раствора с отдельными включениями (фиг. 105, е).

Точечная сварка алюминиевых сплавов требует применения сварочного тока очень большой плотности до (1000 а/мм² и выше). Хорошо очищенные детали при малой плотности тока совершенно не удается сварить, а сварка деталей с естественной окисной пленкой, возможная при несколько меньшей плотности тока, не дает стабильных результатов и не применяется в промышленности.

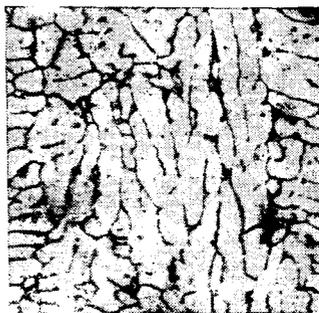
Практически применяемые плотности тока обеспечивают расплавление металла и образование ядра точки заданного размера в значительно меньшие промежутки времени, чем устанавливаемые нормальными режимами сварки алюминиевых сплавов. Удлинение процесса нагрева по сравнению с минимально необходимым временем расплавления ядра объясняется тем, что при быстром нагреве не удается уплотнить металл в ядре — в нем появляются трещины (фиг. 105, ж) и поры. Эти трещины иногда выходят на наружную поверхность деталей. Для уплотнения ядра в



а)



б)



в)

Фиг. 105. Структура точки

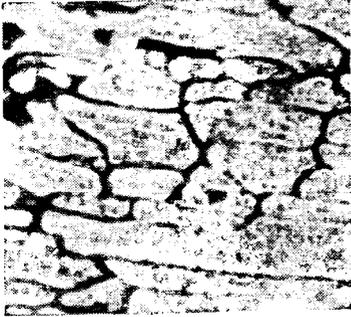
а — макроструктура ($\times 10$); б—в — микроструктура

современных машинах при сварке алюминиевых сплавов применяется увеличенное ковочное давление

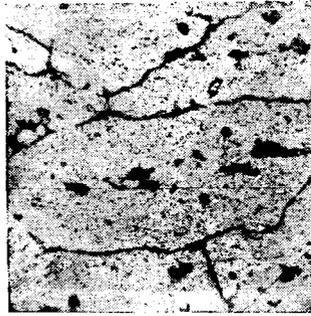
$$P_{ков} = (2 \div 3) P_{св}$$

где $P_{св}$ — усилие, приложенное к электродам во время сварочного нагрева.

В табл. 16 приведены ориентировочные параметры режима точечной сварки алюминиевых сплавов на машинах переменного тока (мощностью до 350 *кв*). Очень хорошие результаты дает сварка алюминиевых сплавов запасенной энергией (см. § 8 гл. XI). В связи с малой длительностью нагрева при сварке запасенной энергией приходится применять очень высокие давления как во время нагрева, так и при проковке. Например, при сварке дуралюминовых деталей толщиной 1,5 *мм* на машине переменного тока $P_{св} = 360$ *кг*, а на конденсаторной машине это усилие повышается до 800—900 *кг*.



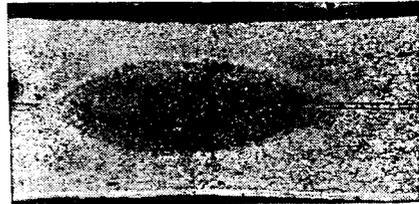
г)



д)



е)



ж)

при сварке дуралюмина:

зон 1—5 ($\times 300$); жс — трещина в ядре ($\times 8$).

Таблица 16

Ориентировочные режимы точечной сварки дуралюмина на точечных машинах переменного тока (при сварке сплава АМц ток увеличивается на 10%)

Толщина каждой детали в мм	Радиус сферической контактной поверхности электродов в мм	Усилие, приложенное к электродам во время сварочного нагрева, в кг	Длительность включения сварочного тока в сек.	Ориентировочная сила тока в сварочной цепи в а
0,5	40	110—130	0,10—0,12	13 000—14 000
0,8	40	160—200	0,14—0,18	16 000—18 000
1,2	50	270—330	0,20—0,26	22 000—24 000
2,0	50	440—520	0,28—0,34	31 000—33 000

Преимущество сварки запасенной энергией заключается в том, что для сварки каждой точки расходуется строго одинаковая порция энергии. Этим достигаются одинаковый нагрев каждой точки и одинаковая ее прочность — результаты сварки очень стабильны. Так, при хорошо налаженной сварке на машине переменного тока, снабженной современной аппаратурой управления и регулирования, колебания показателей прочности точек лежат в пределах $\pm 20\%$; этот предел уменьшается до 10—15% на машинах, осуществляющих сварку запасенной энергией.

Очень хорошие результаты дает сварка алюминиевых сплавов одним постепенно нарастающим импульсом тока длительностью 0,2—0,3 сек., получаемым при питании сварочного трансформатора выпрямителем, включаемым в трехфазную сеть переменного тока.

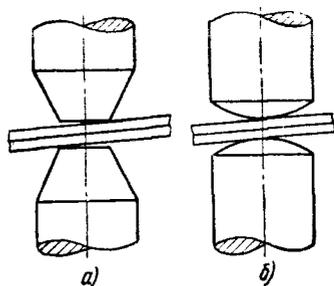
При сварке легких сплавов необходимо обеспечить минимальное выделение тепла в контакте электрод — деталь и интенсивное охлаждение электрода. Поэтому электроды должны обладать высокой тепло- и электропроводностью. Для электродов применяются холоднокатанная медь или специальные сплавы (например, бронза с 1% кадмия), электропроводность которых не ниже 85—90% проводимости меди.

Электроды должны обильно охлаждаться, а их поверхность периодически очищаться от появляющегося во время сварки налета. Этот налет увеличивает контактное сопротивление, вызывает перегрев поверхности деталей и прилипание к ней частиц меди (поверхности детали в месте отпечатка электрода темнеет и теряет свою коррозионную стойкость). Очистка контактной поверхности электродов производится мелкой наждачной бумагой после сварки каждых 20—50 точек. При использовании запасенной энергии зачистка электродов может производиться несколько реже. Для лучшего отвода тепла при сварке алюминиевых сплавов, как правило, применяются электроды с сферической контактной поверхностью. Этим одновременно достигается уменьшение влияния перекосов деталей, что поясняется фиг. 106.

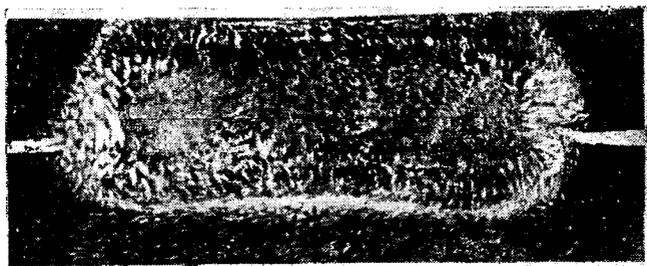
Перегрев контактной поверхности электрода может приводить также к чрезмерному проплавлению детали (фиг. 107), особенно опасному при сварке плакированного дуралюмина; если ядро точки захватывает плакирующий слой алюминия, то последний растворяет некоторое количество меди из дуралюмина и теряет свои антикоррозионные свойства.

Точки при сварке алюминиевых сплавов, обладая высокой прочностью при работе на срез, относительно плохо сопротивляются разрыву (отношение $\frac{P_{разр}}{P_{ср}} = 0,4 \div 0,5$). В связи с этим при сварке длинных швов в ответственных соединениях иногда по концам шва ставится по одной заклепке, препятствующей началу разрушения шва под действием случайных усилий, могущих разорвать сварные точки.

Тепло- и электропроводность основных магниевых сплавов приближаются к аналогичным показателям хорошо свариваемых алюминиевых сплавов. Сварка магниевых сплавов может производиться на режимах, близких к режимам сварки алюминиевых сплавов. Перед сваркой детали из магниевых сплавов должны быть очищены от пленки окислов. Применяется механическая очистка (наждачной бумагой) или травление в специальных растворах с по-



Фиг. 106. Перекос свариваемых деталей при коническом (а) и сферическом (б) электроде.



Фиг. 107. Макроструктура с чрезмерным проплавлением ядра.

следующей промывкой и просушкой. Очищенные детали могут перед сваркой храниться в течение нескольких часов в сухом помещении.

§ 12. ОСОБЕННОСТИ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ МЕДИ, НИКЕЛЯ И ИХ СПЛАВОВ

Точечная сварка чистой меди возможна с применением теплоустойких электродов из вольфрама или молибдена. Качество такой сварки невысокое, стоимость электродов значительная, поэтому точечная сварка меди не получила промышленного применения. Возможна также сварка меди с теплоизолирующими прокладками (см. фиг. 104). Этот способ широкого применения пока не получил.

Условия точечной сварки различных медных сплавов определяются их тепло- и электропроводностью, с одной стороны, и, с другой, — их химическим составом и механическими свойствами. Чем выше тепло- и электропроводность сплава, тем, как правило, труднее его точечная

сварка. Хорошо свариваются медноникелевые сплавы (например, мельхиор, содержащий около 80% меди и 20% никеля; электропроводность мельхиора составляет 8% проводимости меди), кремнистая бронза (около 3% кремния; электропроводность 9%). Несколько хуже свариваются фосфористая бронза и латунь.

Вследствие высокой теплопроводности большинства медных сплавов их сварка на мягких режимах нецелесообразна. Обычно длительность нагрева при сварке медных сплавов ограничивается 0,2—0,4 сек. При сварке сплавов с высоким электрическим сопротивлением (мельхиор, кремнистая бронза) ток по сравнению со сваркой малоуглеродистой стали увеличивается примерно на 25%, а мощность — на 50%; при сварке латуни (электропроводность около 25% проводимости меди) ток повышается на 50%, а мощность — на 100%.

Удельное давление на электроды при сварке медных сплавов близко к давлению, применяемому при сварке малоуглеродистой стали. Иногда (например, при сварке латуни) оно на 20—30% ниже. Медные сплавы перед точечной сваркой должны очищаться от оксидной пленки (механически или травлением).

Хорошо свариваемые медные сплавы могут также удовлетворительно свариваться со сталью. При этом для выравнивания условий нагрева и проплавления со стороны более электропроводного материала (например, латуни) применяется электрод с меньшей контактной поверхностью.

Никель и большинство его сплавов хорошо свариваются точками. В связи с затрудненной пластической деформацией при высоких температурах требуется применение больших удельных давлений на электроды (от 15 до 30 кг/мм²). Электроды применяются в виде усеченного конуса. В связи с высокими удельными давлениями электроды должны изготавливаться из сплавов высокой твердости (например, хромоцинковой бронзы — сплав ЭВ).

§ 13. ПОДБОР РЕЖИМА ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ

Подбор режима точечной сварки обычно состоит из двух последовательных операций: предварительного определения основных параметров режима (на основе технологических инструкций, технических характеристик сварочного оборудования и т. п.) и его корректирования при сварке опытных образцов.

При предварительном подборе режима задаются следующие параметры: ориентировочная сила сварочного тока и примерная длительность его включения (эти параметры подлежат наиболее тщательной корректировке при опытной сварке), усилие на электродах, материал, размеры и форма электродов. Предварительный режим сварки должен быть увязан с конкретным сварочным оборудованием, для которого должны быть известны пределы регулирования длительности включения тока, пределы регулирования силы сварочного тока, пределы регулирования усилия на электродах (см. § 5 гл. XI).

Корректирование режима начинается с воспроизведения на предназначенной для сварки машине предварительно установленных параметров

режима. Затем производится опытная сварка серии образцов (10—20 шт.) из материала заданной марки и толщины. Сварка производится при нескольких значениях тока (путем включения сварочного трансформатора на последовательно возрастающие ступени). Образцы (см. § 14) разрушаются в тисках или скручиваются так, чтобы выявить размеры и структуру ядра точки. Наиболее приемлемой является та ступень трансформатора, при включении которой обеспечивается заданный диаметр ядра в изломе, а во время сварки наблюдаются отдельные, несистематические выплески. Затем следует сварить образцы с несколькими точками в каждом для того, чтобы установить, не приводит ли шунтирование тока к недопустимому уменьшению размеров (и прочности) точек. При этом точки должны располагаться с шагом, принятым в осваиваемом узле. При сварке ответственных узлов желательно, помимо описанных опытных работ, сварить дополнительную серию образцов при постепенно изменяющейся длительности включения тока и на основе механических испытаний этих образцов построить кривую зависимости прочности точки от длительности включения, аналогичную кривым на фиг. 82, а. Окончательно принятый режим должен приближаться к условиям получения максимальной прочности (т. е. лежать на диаграмме вблизи точки С).

Если в силу недостаточной мощности сварочной машины не удастся осуществить вполне качественную сварку по предварительно установленному режиму, то можно несколько уменьшить усилие на электродах (на 20—30%). Это увеличит тепловыделение и облегчит сварку (за счет некоторого уменьшения стабильности результатов по сравнению со сваркой на оптимальном режиме).

§ 14. ДЕФЕКТЫ И КОНТРОЛЬ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ

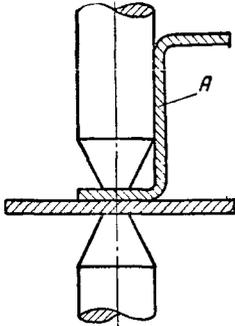
Выше отмечались характерные дефекты, присущие точечной сварке различных материалов. Наиболее опасным дефектом, встречающимся при точечной сварке любых металлов и сплавов, является полный или частичный непровар (отсутствие или малые размеры литого ядра точки). Непровар резко (иногда до 0) понижает прочность сварной точки.

Непровар вызывается недостаточным нагревом деталей при сварке. Возможные причины непровара: а) уменьшение тока из-за падения напряжения в питающей машину сети, введения в контур машины магнитной стали или ослабления и загрязнения (окисления) контактов первичной и в особенности вторичной цепи машины; б) большое шунтирование тока из-за малого шага точек, плохой очистки и сборки деталей, касания свариваемых деталей с токоведущими элементами машины вне зоны сварки (например, в точке А, фиг. 108); в) уменьшение электрического сопротивления свариваемых деталей из-за значительного увеличения контактной поверхности электрода или случайного увеличения приложенного к электродам усилия; г) уменьшение длительности нагрева вследствие нечеткой работы аппаратуры управления сварочным циклом (при сварке на машинах автоматического

действия) или низкой квалификации сварщика (при использовании неавтоматического оборудования) и д) случайное увеличение толщины свариваемых деталей при использовании некондиционного материала.

Выплеск, причины которого уже рассматривались, как правило, не оказывает значительного влияния на прочность точки. Значительные выплески, обычно связанные с плохой очисткой деталей или с их перегревом при недостаточном усилии на электродах, могут приводить к раковинам в ядре точки и заметному понижению ее прочности.

Подплавление поверхности свариваемых деталей и их прожог являются следствием недопустимого перегрева металла в контакте с электродом из-за неправильной формы конца электрода (см. фиг. 96), смещения электродов, перекаса деталей при их установке, загрязнения поверхности деталей или электродов. Прилипание к контактной поверхности электродов или деталей посторонних частиц, резко повышающих контактное сопротивление, также может вызывать подплавление и прожог. Часто прожог вызывается включением или выключением сварочного тока при действии неполного усилия электродов. Прожог, ведущий к образованию трещин или сквозных отверстий в месте сварки, — недопустимый дефект, оказывающий существенное влияние на прочность сварной точки, а иногда и конструкции в целом.



Фиг. 108. Касание боковой поверхности электрода со свариваемой деталью.

Глубокое вмятие на поверхности деталей (более 15—20% толщины свариваемых деталей), могущее несколько понизить прочность соединения, вызывается перегревом, значительными выплесками, резким уменьшением контактной поверхности электродов (при их неправильном зашлифовании или перегорке) или плохим качеством сборки деталей (большими зазорами).

Трещины, встречающиеся при сварке некоторых легированных сталей и легких сплавов, обычно являются следствием малой зоны разогрева и слишком быстрого охлаждения после сварки, т. е. чрезмерно жесткого режима сварки.

Незначительная рыхлость в ядре точки, образующаяся при усадке металла при недостаточном или несвоевременно приложенном ковочном давлении электродов, обычно не оказывает существенного влияния на прочность точки при статической нагрузке.

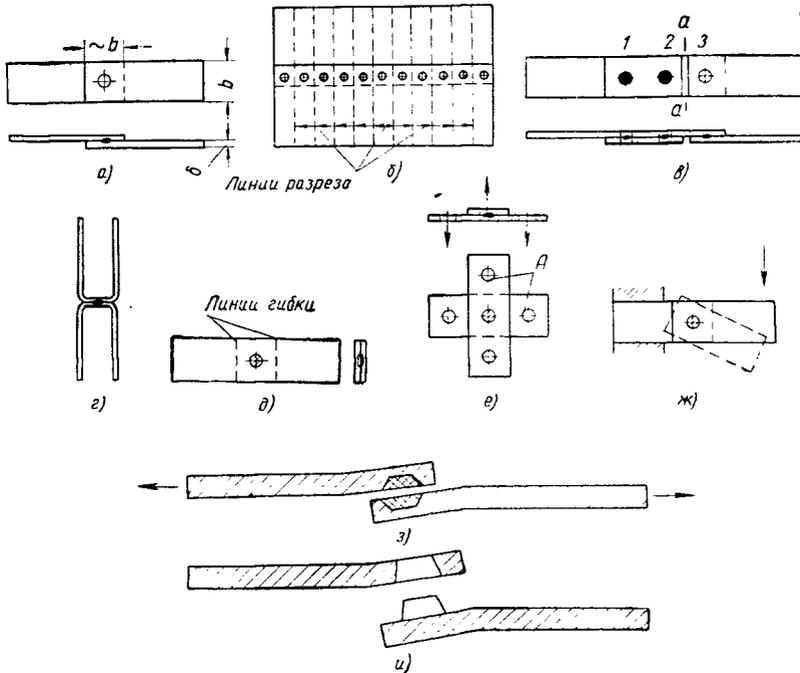
Часть дефектов обнаруживается при внешнем осмотре сваренного узла. К ним относятся сквозные трещины, глубокое вмятие, разрушение защитных покрытий, прожоги. Остальные дефекты, и в их числе наиболее опасный дефект — непровар, выявить внешним осмотром нельзя.

Борьба с непроваром ведется в двух направлениях: путем автоматизации процесса сварки (см. гл. XIII) и путем контроля качества сварных точек.

В настоящее время отсутствуют способы контроля сварных точек, позволяющие без разрушения соединения установить степень провара

(в отдельных случаях при сварке дуралюмина для этой цели может применяться рентгеновское просвечивание), поэтому основное значение при определении качества сварки имеют механические испытания сваренных конструкций или специальных контрольных образцов.

Механические испытания контрольных образцов производятся на срез или разрыв. Механические свойства хрупких точек лучше выявляются испытанием на разрыв.



Фиг. 109. Образцы для механических испытаний сварных точек.

Типовые образцы для испытания точек на срез показаны на фиг. 109, а — в. На результаты испытания на срез существенно влияет ширина образца b , которая обычно принимается равной $5\delta + 15$ мм, где δ — толщина металла.

Для оценки влияния шунтирования на качество сварной точки применяются специальные образцы. При тонком металле (до 2 мм) сваривается образец по фиг. 109, б. Шаг точек должен соответствовать шагу, принятому в контролируемом изделии. После сварки большой образец разрезается вдоль пунктирных линий на малые образцы, каждый из которых подвергается нормальному испытанию до разрушения сварной точки. При сварке более толстого металла такая разрезка образца затруднительна, поэтому иногда применяются образцы, показанные на фиг. 109, в. В этих образцах последовательно свариваются две или три (1, 2, 3) точки с заданным шагом. Затем одна из пластин разрезается по

линии $a - a$, и образец испытывается в разрывной машине (определяется прочность точки 3, сваренной последней).

При малой толщине металла для испытания сварных точек на разрыв применяются очень удобные U-образные образцы (фиг. 109, *г*), получаемые из плоского образца (фиг. 109, *д*) отгибанием его концов в тисках. Образцы, сваренные из более толстого металла, испытываются на разрыв по схеме, представленной на фиг. 109, *е*. Во избежание значительного изгиба образца его концы надежно закрепляются в специальном приспособлении, для чего служат имеющиеся в образце четыре отверстия A .

При подборе и контроле режима сварки непосредственно на рабочем месте применяются простейшие технологические пробы. Например, две пластинки заданной толщины свариваются по длине несколькими точками, а затем полученный образец разрушается в тисках зубилом. При сварке металла толщиной более 2 мм очень удобно испытание сварной точки на скручивание. С этой целью образец (фиг. 109, *ж*) зажимается в тиски и скручивается легкими ударами молотка. Угол скручивания и характер излома позволяют оценить качество сварной точки.

При испытании точек как на срез, так и на разрыв наблюдаются два типичных вида излома: по диаметральной плоскости (фиг. 109, *з*) или по периметру точки (фиг. 109, *и*). Характер излома зависит от качества сварки (обычно при втором типе излома оно выше), свойств свариваемого материала и толщины деталей — чем толще детали, тем менее вероятен второй вид излома, так называемый вырыв.

При сварке ответственных изделий контрольные образцы должны свариваться и испытываться регулярно, обычно не реже 1—2 раз в смену.

ГЛАВА VI

ТЕХНОЛОГИЯ РЕЛЬЕФНОЙ И Т-ОБРАЗНОЙ СВАРКИ

§ 1. ТЕХНОЛОГИЯ РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКИ

Рельефная сварка (см. фиг. 12, *a*) — высокопроизводительный процесс, эффективно применяемый в массовом производстве (в автомобильной промышленности, для сварки металлического корпуса с цоколем радиолампы и др.). При этом толщина более тонкой из свариваемых деталей, имеющей в местах сварки заранее выштампованные выступы, или рельефы, обычно лежит в пределах 0,5—4,0 мм.

Рельефная сварка — по существу многоточечная сварка, при которой расположение точек определяется выступами. Для обеспечения одинакового провара в каждом выступе необходимо, чтобы приложенное к электродам усилие и протекающий в сварочной цепи ток равномерно распределялись между всеми одновременно свариваемыми выступами. Важнейшим условием этого является точное прилегание деталей до начала сварки по всем выступам. Поэтому при рельефной сварке требуется очень точная штамповка самих деталей и выступов, что практически осуществимо при использовании мягкой декапированной стали, допускающей штамповку с глубокой вытяжкой. Высота выступов не должна отличаться от заданного размера более чем на 0,08—0,1 мм.

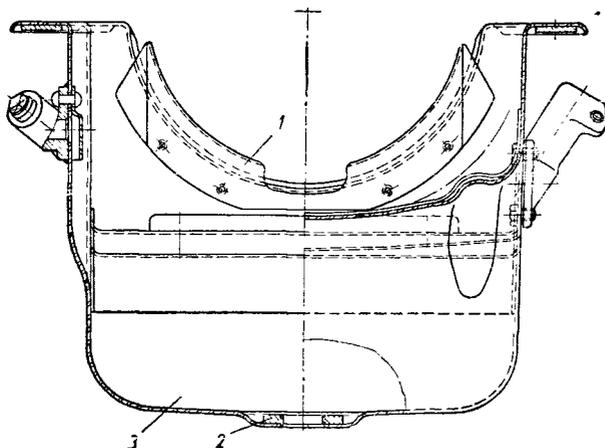
При рельефной сварке требуется тщательная предварительная очистка поверхности деталей, так как загрязнение отдельных (или всех) выступов приводит к резкому изменению их контактного сопротивления и к неравномерному распределению тока между ними.

Нагреваемые при рельефной сварке выступы не должны преждевременно расплющиваться; если расплющивание выступа произойдет до образования в его центре расплавленного ядра, то дальнейший местный нагрев в зоне выступа прекратится, и соединение останется непроваренным (после сплющивания выступов детали придут в соприкосновение по всей их поверхности, и ток устремится, минуя места выступов, через более холодные участки, обладающие меньшим сопротивлением). Необходимая прочность выступов обеспечивается правильным выбором их формы и точным соблюдением этой формы при штамповке.

На фиг. 110 показан пример применения рельефной сварки; усиливающая планка 1 и горловина 2 привариваются к корпусу 3. На фиг. 111 изображены типовые разрезы выступов. Обычно выступы делают на одной из свариваемых деталей (более тонкой, если детали имеют разную

толщину) и имеют в плане круглую форму, обеспечивающую их жесткость и препятствующую преждевременному расплющиванию.

При сварке деталей толщиной $0,5—2,5$ мм целесообразны выступы, получаемые с помощью конического пуансона (фиг. 111, а). В зависимости от толщины стали $D = 3 \div 5$ мм и $H = 0,75 \div 1,25$ мм. Для получения правильной выштамповки ее глубина (размер пуансона) B должна быть на $0,25—0,5$ мм больше высоты выступа H (глубины матрицы). При рельефной сварке деталей толщиной 3 мм и выше достаточная жесткость выступов обеспечивается при их более простой сферической форме (фиг. 111, б). Размер D при этом равен $5—6$ мм.



Фиг. 110. Узел масляного картера автомобиля: детали 1 и 2 соединяются с корпусом 3 рельефной сваркой.

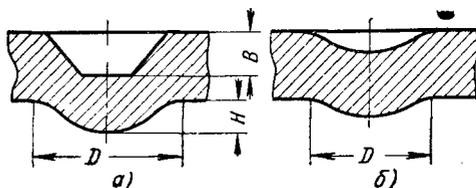
Минимальное расстояние между центрами смежных выступов и от центра выступа до края детали не должно быть меньше $2,5D$.

Рельефная сварка выполняется на специальных сварочных

прессах или на точечных машинах большой мощности, имеющих вертикальный ход верхнего электрода (см. § 3 гл. I).

В зависимости от толщины свариваемой стали для сварки каждого выступа требуется от 25 до 75 ква. При толщине деталей 1 мм усилие сжатия составляет на каждый выступ $100—120$ кг, при толщине $1,5$ мм — до 150 кг, при толщине $2,5$ мм — около 400 кг. При большей толщине деталей это усилие достигает 600 кг и выше. При рельефной сварке хорошие результаты дает применение импульсного нагрева, способствующего равномерному прилеганию деталей по всем выступам, и повышенное ковочное давление.

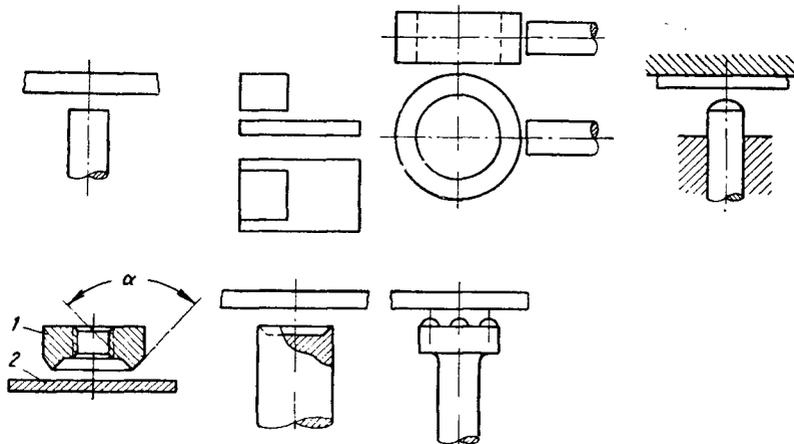
Число импульсов включения тока составляет $3—5$ при длительности каждого импульса $0,08—0,40$ сек. и паузах, соответственно равных $0,06—0,2$ сек. Осуществление такого включения требует применения точно и надежно действующей аппаратуры управления (синхронного прерывателя, см. § 2 гл. XIII).



Фиг. 111. Форма выступов для рельефной сварки.

§ 2. ТЕХНОЛОГИЯ Т-ОБРАЗНОЙ СВАРКИ

При Т-образной сварке соединяются встык две детали резко отличающегося сечения. Примеры применения Т-образной сварки показаны на фиг. 112. В большинстве случаев Т-образная сварка проходит без расплавления, являясь разновидностью сварки сопротивлением. Т-образная сварка производится на точечных машинах, сварочных прессах или (реже) на стыковых машинах.



Фиг. 112. Детали, соединяемые Т-образной сваркой.

При Т-образной сварке не соблюдается одно из важнейших условий получения высококачественного сварного соединения — не обеспечивается одинаковый и равномерный нагрев обеих деталей в зоне их сварки. Поэтому полный провар всего сечения при Т-образной сварке достигается редко. Тем не менее с помощью Т-образной сварки удастся получить достаточно прочное и герметичное соединение (например, соединение горловины 1 с корпусом бачка 2).

Для облегчения условий Т-образной сварки применяется специальная подготовка одной из деталей (сферический конец стержня, выштамповка отдельных выступов на головке болта, кольцевой выступ на гайке).

В последнее время в связи с развитием техники автоматической электродуговой приварки шпилек и созданием для этой цели простой аппаратуры применение Т-образной приварки шпилек к листам стало нерентабельным. Однако Т-образная приварка гаек, горловин, бобышек и тому подобных мелких деталей в массовом производстве сохраняет свое значение.

Условием качественного выполнения Т-образного соединения является рационально выбранная и точно выполненная подготовка деталей. Угол α обычно равен 90° . Острая кромка концентрирует тепло при протекании тока и обеспечивает плотность соединения по всему периметру горловины.

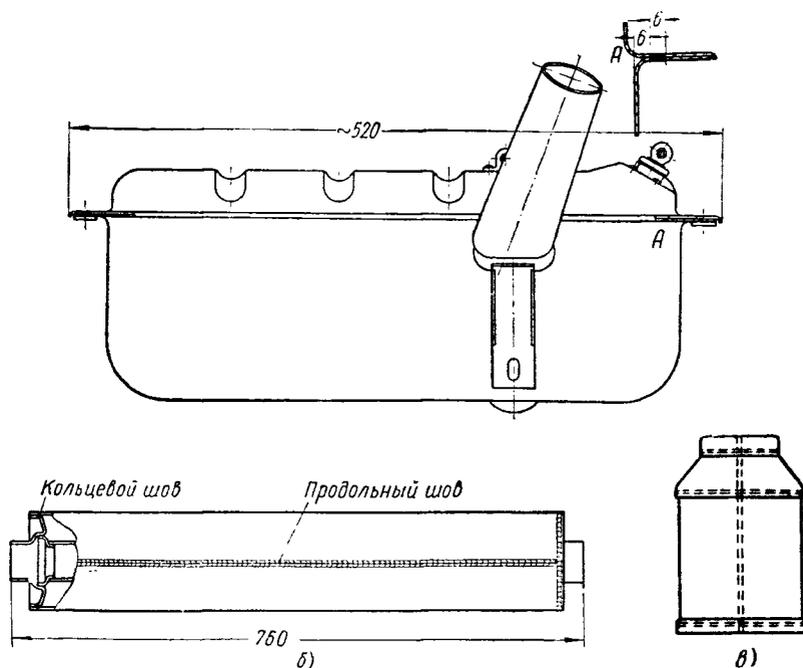
Т-образная сварка производится на жестких режимах ($t_{св} \leq 0,5$ сек.). При этом нагрев ограничивается зоной, непосредственно прилегающей к месту сварки, а деталь в целом остается практически холодной. Благодаря этому привариваемая деталь почти не деформируется при сварке и может быть полностью механически обработана до сварки. Такая последовательность технологических операций, как правило, дает заметное уменьшение трудоемкости механической обработки.

В связи с тем, что при Т-образной сварке трудно гарантировать провар по всему сечению, этот вид соединения нельзя рекомендовать в случае работы соединения при регулярной повторно-переменной нагрузке, так как непровар существенно снижает прочность соединения при этом виде нагрузки.

ГЛАВА VII ТЕХНОЛОГИЯ РОЛИКОВОЙ СВАРКИ

§ 1. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ И ТИПОВЫЕ УЗЛЫ

Роликовая сварка применяется для получения прочных или прочно-плотных (герметичных) швов на изделиях из малоуглеродистой, нержавеющей и жаропрочных сталей, жаропрочных и легких сплавов толщиной от долей миллиметра до 1,5 мм, в отдельных случаях 2 мм (при сварке мягкой малоуглеродистой стали).



Фиг. 113. Примеры конструкций с применением роликовой сварки:
a — бензиновый бак автомобиля; *б* — глушитель автомобиля;
в — молочный бидон.

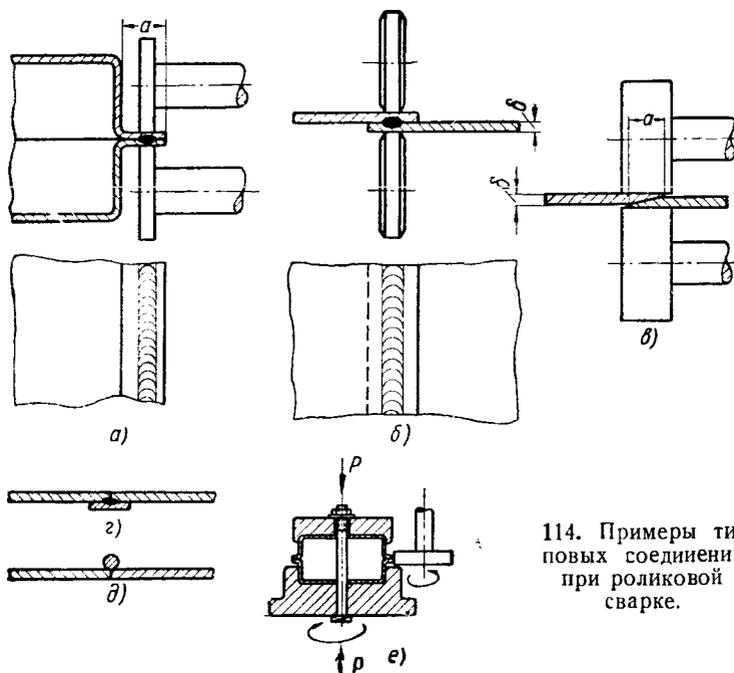
Примеры эффективного применения роликовой сварки: бензиновый бак автомобиля, свариваемый по контуру из двух штампованных половин (фиг. 113, *a*); глушитель автомобиля, в котором продольный шов корпуса и его соединение с доньями осуществляются роликовой сваркой (фиг. 113, *б*); молочный бидон (фиг. 113, *в*), в котором все

основные соединения выполнены роликовой сваркой. Роликовая сварка широко используется в производстве комнатных электрохолодильников (изготовление шкафов, испарителей), газогенераторов, огнетушителей, реактивных двигателей и многих других изделий.

Толщина материала при роликовой сварке обычно ограничивается следующими значениями (в мм):

Мягкая декапированная сталь	2+2
Горячекатанная малоуглеродистая сталь	1,75+1,75
Нержавеющие и жаропрочные стали и сплавы	1,5 +1,5
Латунь и кремнистая бронза	1,2 +1,2
Алюминиевые сплавы	1,5 +1,5

Наибольшее распространение при роликовой сварке получили два типа соединений: соединение с отбортовкой (фиг. 114, а) и соединение внахлестку (фиг. 114, б). Примером первого является шов бензинового

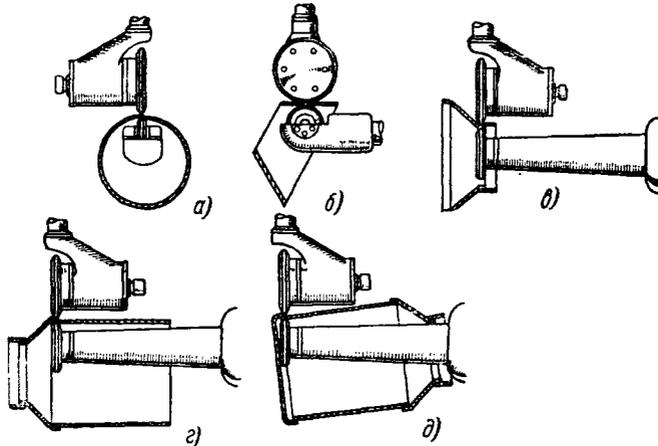


114. Примеры типовых соединений при роликовой сварке.

бака (см. фиг. 113, а). Преимущества этого соединения: размещение изделия во время сварки вне контура сварочной машины и отсутствие пересекающихся швов. Этим обеспечивается постоянство условий сварки по всему периметру соединения и, как следствие, однородное качество шва по всей его длине. Основной недостаток этого типа конструкции — необходимость штамповки деталей бака с глубокой вытяжкой, что требует использования мощных прессов и окупается только в массовом производстве.

Ширина отбортовки не должна быть меньше 12 мм при толщине стали 1 мм, 16 мм при $\delta = 1,5$ мм и 18 мм при $\delta = 2$ мм. При меньшей ширине отбортовки возможно выдавливание нагретого металла в сторону, сопровождаемое местным утоньшением деталей и понижением прочности соединения. Нормально суммарная толщина деталей в месте сварки приближается к 2δ .

Наибольшее распространение в промышленности получило соединение внахлестку. Минимальная ширина нахлестки a , как и для соединения с отбортовкой, лежит в пределах 12—18 мм. При этом толщина изде-



Фиг. 115. Схема технологического процесса роликовой сварки бидона.

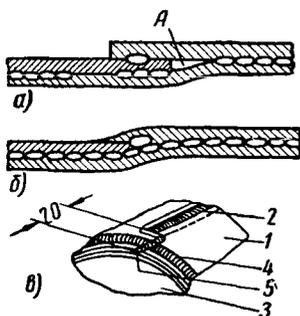
лий в месте сварки также приближается к 2δ . В некоторых случаях желательно получение после сварки гладкой поверхности изделия без уступа. Для этого может быть использован один из следующих приемов: сварка широкими роликами по узкой нахлестке (фиг. 114, *в*) шириной $(1,5 \div 2)\delta$; сварка с подкладкой (фиг. 114, *з*); сварка с присадочной проволокой, укладываемой поверх шва (фиг. 114, *д*). Все эти способы сварки не гарантируют плотности соединения, прочность которого часто не превышает 50% прочности основного металла. Сварка по узкой нахлестке вызывает значительный износ роликов; применение подкладок и присадочной проволоки усложняет и удорожает процесс.

При сварке мелких полых деталей, штампованных из тонкой стали, иногда применяется сварка по узкой отбортовке (фиг. 114, *е*). Наличие силы P способствует получению шва удовлетворительного качества.

Роликовая сварка очень часто применяется при изготовлении цилиндрических изделий (бачков, бидонов и т. п.), состоящих из обечайки и донышек. Обечайка сваривается по образующей продольным швом (продольная сварка) и с донышками — кольцевыми швами (поперечная сварка). Это иллюстрируется технологическим процессом сварки бидона (фиг. 115). Операции *а* и *б* — продольная сварка; остальные (*в*, *г*, *д*) — поперечная. Как видно из приведенных эскизов, переход от продольной

сварки к поперечной требует поворота на 90° плоскости расположения электродов (роликов).

При сварке цилиндрических изделий наиболее сложным является место пересечения продольного и кольцевого швов, где при отсутствии специальной подготовки деталей образуется зазор *A* (фиг. 116, *a*). Этот зазор при сварке кольцевого шва вызывает прожог и нарушение плотности изделия. Для того чтобы избежать зазора, конец продольного шва после его сварки (и до сборки с доньшками) обрабатывается „на ус“ (фиг. 116, *b*). Иногда для этой цели применяется конструкция, показанная на фиг. 116, *в*. Обечайка *1* с продольным швом *2* сваривается с доньшком *3* с помощью кольцевого шва *4*. В углу листа обечайки сделан предварительный прямоугольный вырез со стороны около 20 мм (при вырезке контура листа штампом это не требует дополнительных операций). Продольный шов обечайки сваривается внахлестку до концевого выреза. После этого вставляется днище и сваривается кольцевым швом *4* (не пересекающимся в данном случае с продольным швом). В последнюю очередь подваривается концевой участок шва *5*.



Фиг. 116. Пересечение продольного и кольцевого швов.

Для этого используется газовая или электродуговая сварка. При штампованных заготовках этот способ дешевле, чем промежуточная подготовка концов продольного шва.

Размеры изделий, свариваемых по внешней отбортовке (типа бензинового бака), не связаны непосредственно с конструкцией оборудования; размеры изделий, вводимых при сварке в контур машины (см. фиг. 92, *a*) или надеваемых на плечо и ролик машины, ограничиваются конструктивными параметрами сварочных машин (см. § 3 гл. XII).

§ 2. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ РЕЖИМА РОЛИКОВОЙ СВАРКИ

Как указывалось выше, роликовая сварка по существу является разновидностью точечной сварки, при которой отдельные сварные точки, образующие непрерывный шов, частично перекрывают друг друга. Вследствие очень близкого размещения смежных точек, несмотря на относительно высокое удельное сопротивление горячего металла, в зоне, прилегающей к месту сварки, велико шунтирование тока. Поэтому для получения вполне качественных, прочных и плотных швов (без непроваров и прожогов) необходимо обеспечить максимально возможную стабильность всех параметров режима роликовой сварки.

Роликовая сварка может быть непрерывной или прерывистой. В первом случае сварочный ток протекает непрерывно (естественное прерывание переменного тока при его переходе через нулевое значение может также влиять на процесс сварки при большой скорости сварки, т. е. быстром перемещении свариваемых деталей между электродами роликовой машины). Во втором случае

кратковременные импульсы сварочного тока чередуются с регулярными паузами (свариваемое изделие перемещается непрерывно).

Режим роликовой сварки определяется следующими параметрами: шагом образующих шов точек; усилием, приложенным к роликам; диаметром роликов и профилем их рабочей части; циклом сварки (длительностью каждого импульса тока и паузы при прерывистой сварке), скоростью сварки и силой сварочного тока. Значительное влияние на процесс роликовой сварки оказывает также сопротивление свариваемых деталей, зависящее от подготовки их поверхности и от точности заготовки и сборки деталей.

Шаг точек обычно лежит в пределах 1,5—4,5 мм и увеличивается с повышением толщины свариваемых деталей. Для получения плотного шва смежные точки перекрывают друг друга не менее чем на половину их диаметра. В тех случаях, когда не требуется плотности шва, шаг точек может быть увеличен. Иногда за счет удлинения паузы между последовательными импульсами сварочного тока шаг между точками становится больше их диаметра — имеет место ролико-точечная сварка (высокопроизводительный способ точечной сварки с использованием роликовых машин).

Диаметр смежных точек, определяющий ширину шва, лежит в пределах 3—8 мм. Он зависит от толщины свариваемого материала, ширины рабочей части роликов и режима сварки. При нормальном режиме сварки диаметр точки равен или несколько меньше ширины рабочей части ролика.

Усилие, приложенное к роликам, оказывает такое же влияние на процесс роликовой сварки, как усилие, приложенное к электродам, — на процесс точечной сварки (см. § 3 гл. V). С увеличением этого усилия растет необходимая для сварки мощность при одновременном повышении стабильности качества сварных соединений. В современной практике предпочитают применять большие усилия. Максимальные допустимые усилия связаны со стойкостью роликов. Стойкость повышается при: а) применении специальных электродных сплавов, обладающих одновременно высокой твердостью и электропроводностью (например, хромоцинковой бронзы — сплава ЭВ); б) увеличении диаметра роликов; в) улучшении охлаждения роликов (наилучшие результаты дает широко применяемое на производстве наружное охлаждение роликов струйками воды, подаваемыми по тонким трубочкам непосредственно в зону сварки (см. фиг. 197, а); г) применении прерывистой сварки с рационально подобранным отношением длительности сварочного импульса и паузы.

Там, где это возможно, следует применять ролики диаметром 200—250 мм. Уменьшение их диаметра до 150 мм еще допустимо, хотя и снижает стойкость роликов, однако дальнейшее уменьшение диаметра нежелательно и может практиковаться только при сварке внутри изделий малого размера. При этом повышенный износ роликов неизбежен.

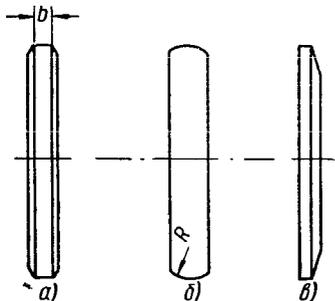
Рабочая часть ролика может иметь цилиндрическую (фиг. 117, а) или сферическую форму (фиг. 117, б). При сварке стали обычно

применяются ролики первого типа ($b = 4 \div 8$ мм), при которых пластическая деформация деталей в месте их сварки происходит несколько легче, чем при сферической контактной поверхности. При сварке изделий с труднодоступными соединениями иногда применяются ролики с одно-сторонним скосом (фиг. 117, в).

При прерывистой сварке общая длительность одного цикла сварки t равна сумме $t_{св}$ и t_n , где $t_{св}$ — длительность одного импульса включения сварочного тока и t_n — пауза. Общая длительность одного цикла сварки (в сек.) определяется шагом точек и скоростью сварки по формуле

$$t = \frac{0,06a}{v}, \quad (48)$$

где a — заданный шаг точек в мм и
 v — скорость сварки в м/мин.



Фиг. 117. Форма роликов.

Отношение $\frac{t_{св}}{t}$ зависит от свойств свариваемого материала и обычно лежит в пределах 0,15—0,70. Как правило, с увеличением тепло- и электропроводности свариваемого материала это отношение уменьшается. Это вызывается применением для сварки импульса тока очень большой силы (при уменьшении тока не обеспечивается провар). Протекание такого значительного тока с малыми паузами (а тем более непрерывное его протекание при непрерывной сварке) ведет к недопустимому перегреву поверхности деталей и роликов, их подгоранию, быстрому износу роликов и порче поверхности свариваемых деталей.

Полная длительность сварочного цикла, а также длительность отдельного импульса тока и паузы всегда принимаются равными целому числу периодов или полупериодов (0,01 сек.) переменного тока. Этим облегчается настройка аппаратуры (прерывателей), регулирующей процесс роликовой сварки.

При большой скорости сварки длительность цикла, определяемая по формуле (48), может приблизиться к длительности полупериода переменного тока промышленной частоты (50 гц). Например, при шаге 2 мм (диаметр точки 4 мм) и скорости сварки 12 м/мин полная длительность цикла составляет 0,01 сек. При этом осуществляется естественное прерывание тока. Для получения плотных швов при скорости сварки более 15—20 м/мин приходится применять ток повышенной частоты (порядка 100 гц). Необходимость в этом может встретиться при ролико-стыковой сварке труб (см. § 4 гл. XII).

Обычно при роликовой сварке на серийном оборудовании ее скорость лежит в пределах 0,5—3,0 м/мин. С увеличением скорости растет производительность труда, однако одновременно резко увеличивается необходимая мощность оборудования. При сварке коротких швов время, затрачиваемое на установку и освобождение изделия из машины, относительно велико, и увеличение скорости сварки мало сказывается на общей длительности выполнения всей операции.

Ток при роликовой сварке зависит от вида и толщины свариваемого материала и от скорости сварки. Он, как правило, на 20—80% выше тока, необходимого для точечной сварки аналогичных деталей.

При роликовой сварке особое значение имеют точная заготовка (штамповка) деталей, тщательная их очистка и сборка. Неправильная отбортовка и неравенство радиусов закруглений (см. фиг. 93), затрудняющие точечную сварку, совершенно недопустимы при роликовой сварке. В связи с жесткими требованиями к качеству штамповки для изготовления деталей, подлежащих роликовой сварке, следует применять качественный металл с минимальными отклонениями по толщине.

§ 3. ОБЩИЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ РОЛИКОВОЙ СВАРКИ

Детали перед сваркой подвергаются двухсторонней общей или местной (на ширине около 20 мм) очистке. Способ очистки зависит от рода свариваемого металла (см. ниже).

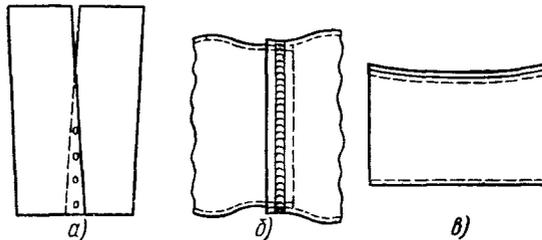
Очищенные детали собираются в приспособлениях или с помощью струбцин, а затем прихватываются точками через 75—150 мм. Чем

толще и жестче свариваемые детали, тем реже могут располагаться прихватки. Прихватку деталей следует начинать от середины соединения и вести к его концам. Из-за нагрева кромок во время прихватки может произойти их искривление (фиг. 118, а), поэтому в процессе прихватки необходимо следить за правильным взаимным расположением соединяемых кромок. Прихватки располагаются по оси подлежащего роликовой сварке шва. Следует избегать прихваток с глубоким вмятием на поверхности, так как такое вмятие может нарушить нормальный ход последующей роликовой сварки (это учитывается при подборе режима точечной прихватки).

Зазоры между деталями (например, между донышком и цилиндрической обечайкой) должны по возможности равномерно распределяться по периметру соединения. После прихватки качество сборки должно быть внимательно проконтролировано. Если при этом обнаруживаются значительные зазоры, то их следует устранить путем правки.

Во избежание возможных прожогов места прихваток перед роликовой сваркой очищаются наждачной бумагой или стальной щеткой от окалины. Одновременно швы в местах их пересечения зашлифовываются „на ус“ (см. фиг. 116, б), если применяется этот способ подготовки кромок.

Роликовая сварка коротких швов производится от одного конца к другому, длинных — от середины к концам. Роликовая сварка, как правило, вызывает заметные сварочные деформации, характерные примеры которых показаны на фиг. 118, б и в. На фиг. 118, б схематически



Фиг. 118. Деформации при роликовой сварке.

показано уменьшение диаметра детали в месте кольцевого шва; на фиг. 118, *в* — искривление образующей цилиндрической обечайки после сварки продольного шва. При значительных деформациях применяется правка молотком на круглой оправке или плите (в зависимости от размеров и формы деформированного узла).

§ 4. СВАРКА МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

Малоуглеродистая сталь, и в особенности мягкая декапированная сталь с содержанием до $0,12\%$ углерода, благодаря пластичности и умеренной электропроводности сваривается роликовой сваркой лучше других материалов (при одинаковой толщине деталей). Прерывистая сварка при любой толщине деталей дает лучшие результаты, чем непрерывная, хотя непрерывная сварка деталей толщиной до 1 мм иногда применяется в производственных условиях (главным образом из-за неуклюжести некоторых старых машин необходимой для прерывистой сварки регулирующей аппаратурой — прерывателями). Холоднокатанная сталь может не подвергаться специальной очистке перед сваркой (если она свободна от грязи и ржавчины); лучший способ подготовки горячекатанной стали — травление.

При прерывистой сварке малоуглеродистой стали длительность отдельного импульса сварочного тока составляет $50\text{--}70\%$ полной длительности одного сварочного цикла.

При сварке малоуглеродистой стали может быть использован любой тип надежно действующей автоматической регулировочной аппаратуры (прерыватель или модулятор, см. § 6 гл. XIII).

В табл. 17 приведены ориентировочные режимы роликовой сварки малоуглеродистой стали на машинах серийного выпуска мощностью до 150 *кв*а.

Таблица 17

Ориентировочные режимы роликовой сварки малоуглеродистой стали прочно-плотным швом на машинах мощностью до 150 *кв*а

Толщина каждой детали в мм	Размеры ролика в мм		Усилие, приложенное к роликам, в кг	Длительность в сек.		Ориентировочная сила тока в сварочной цепи в а	Скорость сварки в м/мин
	Ширина рабочей части	Желательный диаметр		Включение	Пауза		
0,3	4	160	60—100	0,03—0,05	0,02—0,04	4 000—7 000	1—2
0,5	4	180	100—200	0,04—0,08	0,02—0,04	6 000—12 000	1—2
1,0	6	200	180—350	0,06—0,12	0,04—0,06	8 000—15 000	1—2
1,5	8	220	250—550	0,08—0,16	0,04—0,08	12 000—18 000	0,8—1,6
2,0	10	250	350—700	0,14—0,26	0,06—0,12	18 000—25 000	0,6—1,2

Значительные затруднения могут возникать в производственных условиях при роликовой сварке продольных швов длинных изделий, выполненных из малоуглеродистой (или другой магнитной) стали. При перемещении такого изделия в процессе сварки между роликами машины

непрерывно изменяется сечение введенного в контур машины магнитного металла и, как следствие, также непрерывно изменяется сила тока в сварочной цепи. Это поясняется схемой на фиг. 119. Если в начале сварки (положение, показанное на схеме) сварочный ток имеет значение I_n , вполне достаточное для получения удовлетворительного провара, то к середине шва он снижается до величины I_c , едва достаточной для сварки, а к концу падает до I_k — последний участок шва оказывается непроваренным. Положение не улучшится, если установить режим сварки так, чтобы ток к концу сварки равнялся I_n ; тогда конечный участок шва будет сварен хорошо, но ток при этом в начале сварки повысится настолько, что здесь произойдет прожог.

Для борьбы с этим явлением могут применяться следующие меры: а) сварка длинных швов с двух сторон (от середины к концам, или наоборот); б) разбивка длинных швов на отдельные участки с последующей их сваркой на различных режимах, компенсирующих изменение сварочного тока; в) автоматическое непрерывное или ступенчатое регулирование сварочного тока при сварке всего шва с одной установки. Применимость того или иного из перечисленных мероприятий зависит от типа используемого для сварки оборудования и регулировочной аппаратуры.

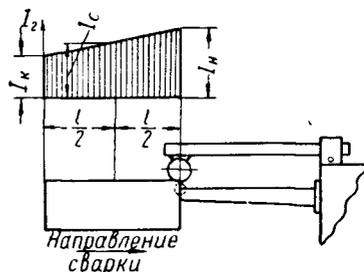
При сварке стали с защитным покрытием особое значение имеет чистота рабочей поверхности роликов. В связи с этим ролики в машинах, предназначенных для сварки стали с покрытиями, обычно приводятся во вращение стальными роликами — шарошками, имеющими накатку. Эта накатка непрерывно удаляет поверхностный слой металла роликов и зачищает их рабочую поверхность в процессе сварки.

§ 5. СВАРКА НЕРЖАВЕЮЩИХ И ЖАРОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ

Нержавеющие и жаропрочные стали аустенитного класса, как правило, хорошо свариваются роликовой сваркой. Из-за относительно высокой прочности этих сталей при повышенных температурах и малой их электропроводности по сравнению со сваркой малоуглеродистой стали одинаковой толщины усилие, приложенное к роликам, увеличивается до 50%, а ток и скорость сварки несколько понижаются.

Отношение длительности включения тока к общей длительности сварочного цикла для аустенитных сталей обычно лежит в пределах 0,4—0,6. При сварке ненагартованной нержавеющей стали прочность сварного соединения приближается к прочности основного металла.

Роликовая сварка нержавеющей стали типа 1X18N9 толщиной 1 мм характеризуется следующими основными параметрами, подчеркивающими при сравнении с данными табл. 17 особенности сварки аустенитной стали: усилие, приложенное к электродам, 250—400 кг; ориентировочный ток в сварочной цепи 5000—8000 а; скорость сварки 0,5—0,6 м/мин.



Фиг. 119. Изменение тока в процессе роликовой сварки длинного продольного шва на обечайке из магнитной стали.

§ 6. СВАРКА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Роликовая сварка алюминиевых сплавов возможна только при протекании значительного тока в сварочной цепи. В связи с этим их сварка требует применения роликовых машин большой мощности (порядка 250—350 *кв*а). Качественная очистка деталей перед роликовой сваркой еще более существенна, чем перед точечной (способы очистки те же).

В связи с применением очень больших токов (до 40 000 *а* при роликовой сварке дуралюмина толщиной 1,5 *мм*) поверхность роликов в зоне контакта легко перегревается; поэтому для алюминиевых сплавов

принимается малое отношение $\frac{t_{cs}}{t} = 0,15 \div 0,35$. Усилие, приложенное к роликам при сварке алюминиевых сплавов, близко к усилиям, применяемым при сварке деталей той же толщины из малоуглеродистой стали. Скорость роликовой сварки алюминиевых сплавов обычно ниже, чем скорость сварки малоуглеродистой стали, и, как правило, лежит в пределах 0,5—1 *м/мин* (при толщине деталей 2—0,5 *мм*).

В связи с относительно малой длительностью включения тока при каждом импульсе особое значение приобретает четкая работа контрольно-регулирующей аппаратуры (прерывателя).

§ 7. ПОДБОР РЕЖИМА И КОНТРОЛЬ РОЛИКОВОЙ СВАРКИ

Методика подбора и корректирования режима при роликовой сварке не отличается от приемов, применяемых при точечной сварке (см. § 12 гл. V).

Контроль качества соединений при роликовой сварке, так же как и при точечной, основывается на систематических испытаниях контрольных образцов. Эти образцы могут выполняться по типу, показанному на фиг. 109, *б*, с заменой отдельных точек сплошным швом. После сварки образец, как показано на фиг. 109, *б*, разрезается поперек шва, и полученные отрезки испытываются на разрывной машине.

При роликовой сварке сосудов прочно-плотными швами производится их испытание на плотность (а при работе под высоким давлением и на прочность). Это испытание в зависимости от размеров сосуда и давления в нем производится сжатым воздухом или водой. Дефектные участки шва подвариваются электродуговой или, чаще, газовой сваркой.

ГЛАВА VIII

ТРАНСФОРМАТОРЫ И ОСНОВНАЯ ПУСКОВАЯ И РЕГУЛИРОВОЧНАЯ АППАРАТУРА МАШИН ДЛЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

✓ § 1. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ МАШИН ДЛЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

Все машины для контактной сварки состоят из двух более или менее тесно связанных друг с другом частей: механической и электрической. Механическая часть машины обычно представляет собой устройство для закрепления, сжатия и перемещения свариваемых деталей. Часто отдельные элементы механизмов, помимо своей основной функции, проводят сварочный ток.

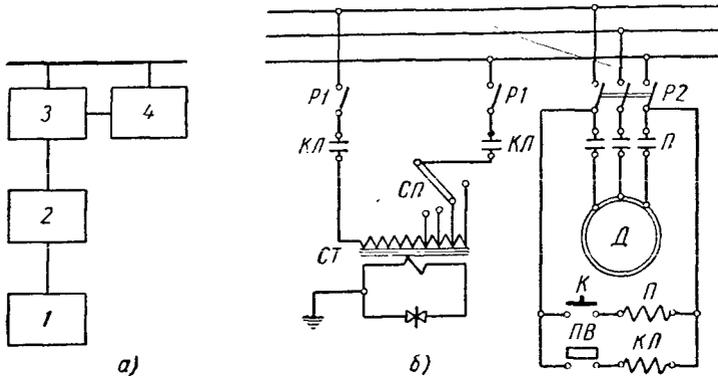
Электрическая часть машины для контактной сварки обычно состоит из следующих основных узлов: сварочной цепи машины (сварочного контура), подводящей ток от источника питания к электродам (роликам); источника питания (в большинстве сварочных машин — однофазного понизительного трансформатора); аппаратуры для регулирования мощности машины; пусковой аппаратуры.

Взаимодействие отдельных электрических узлов поясняется электрическими схемами, которые в зависимости от их назначения бывают трех типов: скелетные или блок-схемы, принципиальные и монтажные.

Скелетная схема дает лишь самое общее представление о сварочной машине. На ней показываются в виде отдельных прямоугольников (блоков) основные агрегаты электрооборудования, а их взаимная связь обозначается одиночными линиями. Скелетная схема сварочной машины с электроприводом основных механизмов приведена на фиг. 120, а. В данном случае имеются четыре основных узла: сварочный контур 1, трансформатор с регулировочными устройствами 2, пусковая аппаратура 3 и электродвигатель привода 4. Схема, в частности, показывает, что пусковая аппаратура одновременно обслуживает как сварочный трансформатор, так и привод.

Принципиальная электрическая схема той же машины приведена на фиг. 120, б. Принципиальная схема показывает взаимодействие всех электрических узлов машины, однако сами узлы изображаются условно и размещаются на схеме так, чтобы обеспечить легкое ее чтение. Принципиальная схема служит для изучения и анализа работы машины.

Монтажная электрическая схема показывает с более или менее точным соблюдением масштаба расположение всего электрооборудования сварочной машины, расположение и сечение всех соединительных проводов и содержит другие сведения, необходимые для монтажа.



Фиг. 120. Электрические схемы контактных машин:
а — скелетная; б — принципиальная.

§ 2. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СВАРОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Для контактной сварки необходимы очень большие токи (1000—100 000 а). В наиболее часто встречающихся машинах сварочный ток лежит в пределах 2000—40 000 а. При этом напряжение между рабочими элементами машины (электродами или роликами) во время сварки редко превышает 5 в. Это напряжение определяется по формуле

$$U_2 = I_2 R, \quad (49)$$

где I_2 — ток в сварочной цепи и

R — общее сопротивление свариваемых деталей (оно может иметь и индуктивную составляющую).

Сопротивление R в процессе сварки редко превышает 250 мком (обычно оно значительно ниже). Таким образом, в машинах для контактной сварки источник питания — сварочный трансформатор — должен обеспечивать значительный ток при относительно очень низком напряжении.

Сварочный трансформатор характеризуется следующими главными параметрами: первичным напряжением U_1 (напряжением сети, от которой питается трансформатор); электродвижущей силой вторичной обмотки E_2 ; мощностью P и режимом работы.

Трансформаторы контактных машин, как правило, выполняются для включения в сеть с напряжением 220 или 380 в. Иногда выпускаются трансформаторы на 500 и 127 в. Каждый трансформатор, как правило, рассчитывается на включение в сеть только с одним определенным напряжением и без коренной переделки не может быть использован для включения в сеть с другим напряжением.

Полная электродвижущая сила (э.д.с.) E_2 на зажимах вторичной обмотки сварочного трансформатора больше рабочего напряжения U_2 на элек-

тродах, так как в сварочной цепи машины вследствие значительного ее активного и индуктивного сопротивления имеет место существенное падение напряжения. Величина E_2 может быть найдена по формуле

$$E_2 = I_2 Z = I_2 \sqrt{(R + R_{вн})^2 + X_L^2}, \quad (50)$$

где R — сопротивление свариваемых деталей (в основном активное);
 $R_{вн}$ — активное сопротивление сварочной цепи машины;
 X_L — ее индуктивное сопротивление;
 Z — полное сопротивление машины и свариваемых деталей.

Обычно E_2 лежит в пределах 1—24 в. В машинах стационарного типа E_2 редко превышает 16 в. Более высокие значения E_2 иногда требуются в переносных машинах, в которых отдельно расположенный трансформатор соединяется со сварочным инструментом (например, клещами) длинными проводами. Отношение $\frac{U_1}{E_2}$ определяет коэффициент трансформации.

Потребляемая машиной при сварке мощность, выраженная в киловольтамперах (*квa*), равна

$$P = \frac{E_2 I_2}{\eta}, \quad (51)$$

где E_2 — э. д. с. вторичной обмотки сварочного трансформатора;
 I_2 — ток в сварочной цепи (во вторичной обмотке трансформатора);
 η — к. п. д. трансформатора.

Наибольшее распространение имеют машины с трансформаторами мощностью 5—200 *квa*. В отдельных случаях применяются трансформаторы мощностью до 1000 *квa* и выше.

Существенный параметр трансформатора и сварочной машины, в целом — режим ее работы, определяемый продолжительностью включения (ПВ) в процентах:

$$ПВ = \frac{t_{св}}{t} 100\%, \quad (52)$$

где $t_{св}$ — время фактического включения сварочного тока в течение расчетного цикла t и

t — полная длительность расчетного цикла.

Величина ПВ может существенно отличаться для различных типов машин. Обычно она принимается равной: для стыковых машин — 20—25%; для точечных машин и сварочных прессов — 12,5 — 20%; для роликовых машин — 50%.

✓ § 3. КОНСТРУКЦИЯ СВАРОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Подавляющее большинство машин для контактной сварки питается от однофазных понизительных трансформаторов, рассчитываемых на прямое включение в сеть переменного тока частотой 50 *гц*. Лишь в отдельных случаях трансформаторы питаются током непромышленной частоты (пониженной — порядка 2,5 — 3 *гц*, или повышенной — 100—300 *гц*). Особым случаем является также питание трансформатора от батареи конденсаторов (в конденсаторных машинах) или от выпрямителя

(в индукционных машинах). Трансформатор состоит из магнитопровода (сердечника), первичной и вторичной обмоток.

В машинах для контактной сварки применяются три типа трансформаторов, отличающихся конструкцией магнитопровода (фиг. 121): стержневой, броневого и кольцевого. Стержневой трансформатор (фиг. 121, а) проще в изготовлении, но имеет несколько худшие электрические характеристики. Наибольшее распространение получил в современных машинах броневого трансформатор (фиг. 121, б), в котором все обмотки размещаются на центральном стержне магнитопровода. Кольцевые трансформаторы (фиг. 121, в) применяются главным образом в машинах для ролико-стыковой сварки труб. Институт электросварки им. Патона разработал кольцевой трансформатор, охватывающий свариваемый стык трубы. Катушки его первичной обмотки распределены вдоль кольцевого сердечника, который может раскрываться для установки и снятия свариваемых труб. Параллельно соединенные элементы вторичного витка также распределены вдоль сердечника и подводят ток к кромкам труб по всему их периметру. Вследствие малого сварочного контура трансформатор имеет высокий коэффициент мощности и к. п. д.

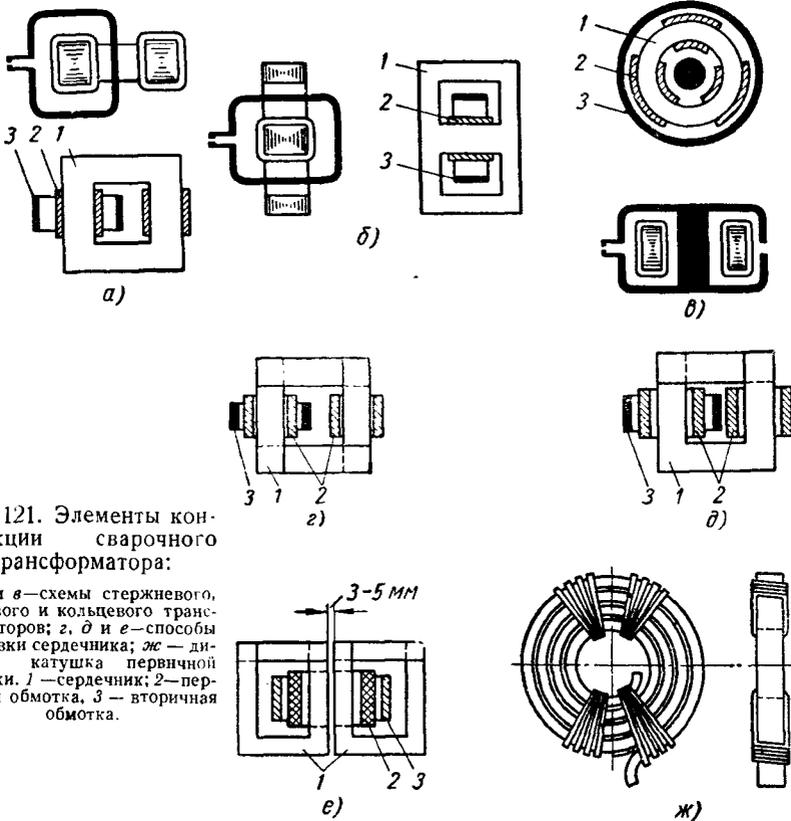
Для уменьшения вихревых токов и связанного с ними вредного расхода энергии магнитопровод набирается (шихтуется) из изолированных друг от друга листов специальной трансформаторной стали толщиной 0,35—0,5 мм. Для изоляции листы после штамповки покрываются с одной стороны лаком. Хорошая трансформаторная сталь должна обладать высокой магнитной проницаемостью при относительно большом электрическом сопротивлении. Такое сочетание свойств достигается присадкой к стали 2—4% Si.

Магнитопровод обычно собирается из отдельных листов внахлестку (фиг. 121, г). Для уменьшения сопротивления магнитной цепи зазоры в стыках между листами должны быть минимальными (порядка 0,01 см). Количество стыков в магнитопроводе равно четырем (фиг. 121, г), а при специальной П-образной штамповке листов (фиг. 121, д) — двум. Это же количество стыков сохраняется в броневого сердечнике, состоящем из двух параллельных магнитных цепей (фиг. 121, е).

Первичная обмотка сварочного трансформатора выполняется из медного провода прямоугольного, реже круглого сечения. Применяются цилиндрическая и дисковая обмотки. При цилиндрической обмотке все ее витки образуют одну или две цилиндрические катушки (фиг. 121, г). Дисковая обмотка разделяется на несколько (5—8) последовательно соединяемых дисковых катушек (одна из таких катушек показана на фиг. 121, ж). Применение дисковой обмотки облегчает ремонт трансформатора, так как при повреждении обмотки можно заменить одну катушку без общей перемотки трансформатора. Дисковые катушки первичной обмотки обычно чередуются с элементами вторичной обмотки, что обеспечивает хорошее магнитное сцепление обмоток (малый поток рассеяния) и, как следствие, высокий коэффициент мощности трансформатора. Кроме того, чередование элементов первичной и вторичной обмоток улучшает их охлаждение за счет отвода

тепла в элементы вторичной обмотки, часто имеющие водяное охлаждение

Витки первичной обмотки тщательно изолируются друг от друга и от остальных элементов машины. Качество изоляции в значительной степени определяет срок службы сварочного трансформатора. Если для первичной обмотки не применяется изолированный провод (например, типа ПБД — провод с двойной хлопчатобумажной изоляцией), то отдельные витки изолируются друг от друга электротехническим картоном (прессшпаном). Готовые катушки надежно стягиваются и одновре-



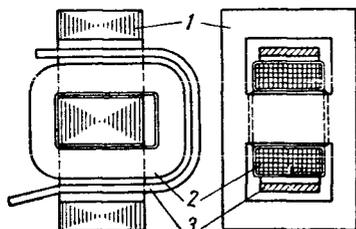
Фиг. 121. Элементы конструкции сварочного трансформатора:

a, б и в — схемы стержневого, броневого и кольцевого трансформаторов; *г, д и е* — способы шихтовки сердечника; *ж* — дисковая катушка первичной обмотки. 1 — сердечник; 2 — первичная обмотка, 3 — вторичная обмотка.

менно изолируются обматыванием хлопчатобумажной (так называемой киперной) лентой с последующей пропиткой в специальном лаке и просушкой при температуре около 100°. Первичная обмотка изолируется от вторичной и от магнитопровода прессшпаном, фиброй или лакотканью.

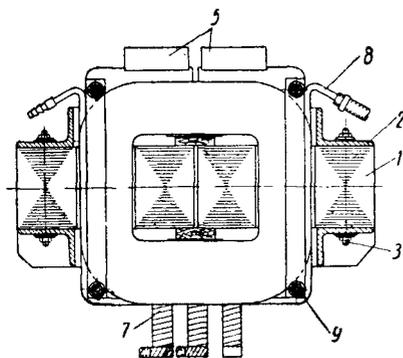
Как показано ниже, регулирование мощности сварочного трансформатора обычно достигается изменением числа включенных витков его первичной обмотки. Чем меньше число включенных витков, тем при неизменном числе витков вторичной обмотки меньше коэффициент трансформации, тем выше э. д. с. вторичной обмотки и тем выше, как

следствие, мощность трансформатора. Поэтому наибольшая мощность трансформатора достигается при включении части витков первичной обмотки. Остальные витки, включаемые при более низкой мощности, могут иметь меньшее сечение. Возможность уменьшения сечения отдельных витков первичной обмотки иногда используется как средство уменьшения расхода меди при изготовлении трансформатора. Применение в одном и том же трансформаторе медного провода разного сечения усложняет ремонт сварочных машин.

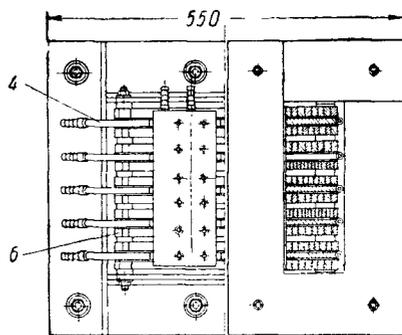


Фиг. 122. Броневой трансформатор с цилиндрической первичной обмоткой и гибким вторичным витком.

составляется в современных трансформаторах из трех или более плоских (дисковых) элементов, соединяемых друг с другом параллельно (в электрическом отношении они образуют один виток).



Фиг. 123. Современный броневой трансформатор мощностью 200 ква с дисковой обмоткой („Электрик“).



Вторичный виток может быть гибким или жестким. В первом случае он набирается из гибкой медной фольги толщиной 0,2—0,4 мм и непосредственно соединяется с подвижными элементами сварочного контура машины (например, с зажимами стыковой машины). При этом применяются броневой сердечник 1 и цилиндрическая первичная обмотка 2 (фиг. 122). Между первичной и вторичной 3 обмотками имеется значительный зазор. Трансформаторы этого типа очень просты по конструкции, но мало совершенны электрически — они применяются только в машинах малой мощности.

Конструкция нормального трансформатора для машин средней и большой мощности (50 *кв*а и выше) с жестким вторичным витком и дисковой первичной обмоткой показана на фиг. 123. Броневой сердечник 1 стяннут рамками 2 из угловой стали с помощью изолированных болтов 3. На сердечник надеты пять соединенных параллельно плоских элементов вторичного витка 4, вырезанных из медного листа толщиной 6—10 мм. Концы листов 4 приварены к колодкам 5, в которых имеются отверстия с резьбой для крепления шин, соединяющих трансформатор со сварочным контуром машины. Первичная обмотка трансформатора состоит из десяти дисковых катушек 6, расположенных попарно около каждого элемента вторичного витка. Концы первичной обмотки 7 выведены под трансформатор и имеют отверстия для присоединения проводов, идущих от питающей сварочную машину сети.

Вторичный виток охлаждается водой, для чего по периметру отдельных его элементов припаяны трубки 8. Катушки первичной обмотки плотно прижаты ко вторичному витку деревянными клиньями, создающими между обмотками зазоры для воздушного охлаждения. Все обмотки надежно стянуты болтами 9 и расклинены на сердечнике. Это предупреждает их взаимное перемещение и порчу изоляции под действием больших электромагнитных сил, возникающих при протекании значительного сварочного тока в трансформаторе. Иногда для лучшего охлаждения весь трансформатор заливается специальной массой, состоящей из битума и кварцевого песка. Эта масса обладает хорошими электроизоляционными свойствами при относительно высокой теплопроводности, способствующей надежному охлаждению трансформатора.

Вторичный виток трансформатора и элементы сварочного контура машины изолируются только в местах непосредственного контакта с заземленными частями машины. При этом одна точка сварочной цепи всегда электрически соединяется с корпусом машины. Этим достигается заземление сварочной цепи, необходимое по условиям техники безопасности (сварщик, непосредственно соприкасающийся с элементами сварочной цепи машины, защищается таким образом от действия высокого напряжения при случайном пробое изоляции первичной обмотки трансформатора).

§ 4. РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС СВАРОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

На фиг. 124, *а* дана принципиальная схема идеального трансформатора, в котором первичная обмотка, имеющая w_1 витков, присоединена к сети переменного тока напряжением U_1 , а вторичная обмотка с w_2 витками питает нагрузку при напряжении U_2 . В идеальном трансформаторе сопротивление первичной и вторичной обмоток равно нулю, отсутствуют потери энергии в сердечнике (вызываемые в реальном трансформаторе гистерезисом и вихревыми токами) и отсутствует магнитное рассеяние, т. е. весь магнитный поток, создаваемый обмотками трансформатора, в любой момент полностью замыкается через железный сердечник и одновременно пронизывает обе

обмотки. К. п. д. такого трансформатора равен единице, и для него справедливы следующие соотношения:

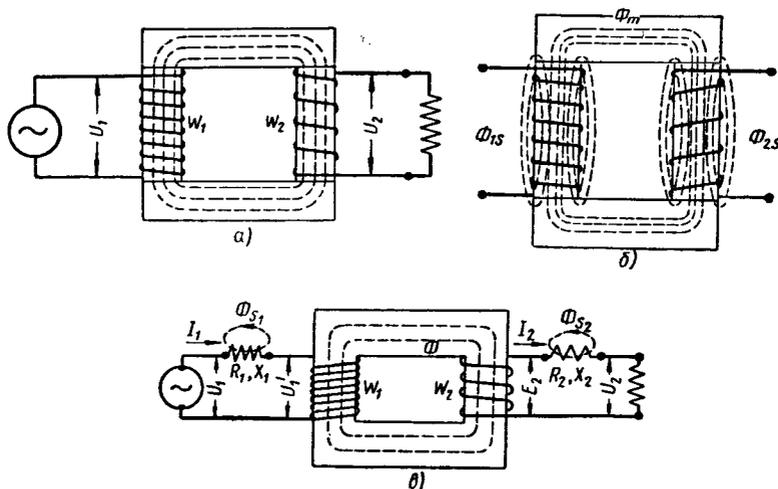
$$U_1 = 4,44f\omega_1\Phi_m \quad \text{и} \quad U_2 = 4,44f\omega_2\Phi_m; \quad (53)$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = n, \quad (54)$$

где f — частота в Гц ;

n — коэффициент трансформации;

Φ_m — амплитудное значение магнитного потока (максимальное значение потока, изменяющегося по синусоидальному закону).



Фиг. 124. Электрические схемы трансформатора:

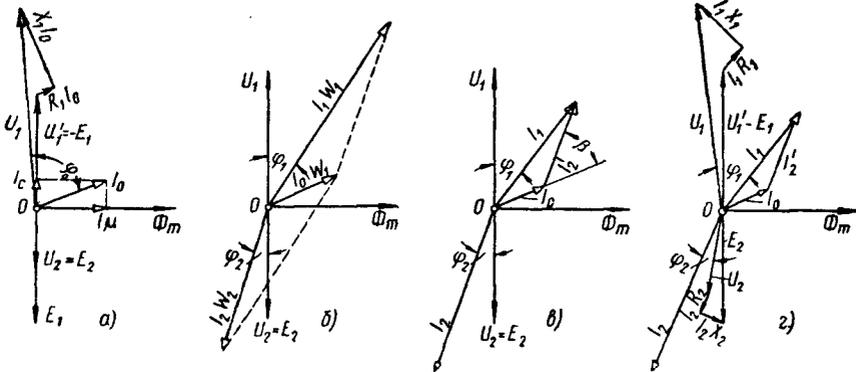
a — идеального; b — реального; c — эквивалентная схема трансформатора с активными потерями и потоками рассеяния.

В действительном трансформаторе часть индукционных линий магнитного потока, возбуждаемого током первичной и вторичной обмоток, замыкается через окружающий воздух, минуя сердечник и вторичную обмотку и образуя магнитный поток рассеяния (Φ_{1s} и Φ_{2s}), схематически показанный на фиг. 124, b . Поток рассеяния тем меньше, чем равномернее распределена обмотка вдоль сердечника и чем ближе друг к другу и к сердечнику расположены витки первичной и вторичной обмоток. Поток рассеяния создает индуктивное сопротивление обмоток трансформатора. Активное и индуктивное сопротивления обмоток трансформатора учитываются введением последовательно с его первичной и вторичной обмотками эквивалентных (равноценных) сопротивлений R_1 , X_1 и R_2 , X_2 (фиг. 124, c).

Анализ работы трансформатора обычно начинается с изучения его холостого хода, когда при замкнутой первичной цепи его вторичная цепь разомкнута (в машинах для контактной сварки трансформаторы редко работают в режиме холостого хода, так как ток в первичной

цепи, как правило, включается после зажатия свариваемых деталей между электродами, т. е. после замыкания вторичной цепи машины).

При холостом ходе трансформатора в его первичной обмотке начинает протекать ток холостого хода I_0 . При этом в сердечнике возникает переменный магнитный поток, изменяющийся по синусоидальному закону, амплитудное значение которого равно Φ_m . Этот поток наводит в первичной и вторичной обмотках трансформатора электродвижущие силы (э. д. с.), равные E_1 и E_2 , которые отстают по фазе от магнитного потока на 90° . При разомкнутой вторичной цепи трансформатора напряжение на ее зажимах $U_2 = E_2$, так как $I_2 = 0$ и потери во вторич-



Фиг. 125. Векторные диаграммы трансформатора:

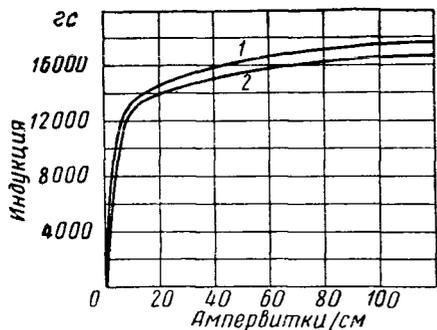
a — при холостом ходе; *б* — магнитодвижущие силы при работе идеального трансформатора; *в* — токи и напряжения при работе идеального трансформатора; *г* — токи и напряжения в реальном трансформаторе.

ной цепи отсутствуют. Напряжение на зажимах первичной обмотки при отсутствии в ней потерь должно быть равно по величине и противоположно по фазе э. д. с. E_1 .

Ток холостого хода складывается из двух составляющих: реактивного намагничивающего тока I_μ , совпадающего по фазе с магнитным потоком Φ_m , и активного тока I_c , вызываемого потерями энергии в сердечнике вследствие гистерезиса и вихревых токов. На фиг. 125, *a* показана так называемая векторная диаграмма трансформатора при холостом ходе, на которой в определенных масштабах отложены в соответствующих направлениях величины магнитного потока Φ_m , напряжений, электродвижущих сил и токов. По оси абсцисс отложен вектор магнитного потока Φ_m и параллельный ему вектор намагничивающего тока I_μ . Векторы э. д. с. первичной и вторичной обмоток E_1 и E_2 направлены под углом 90° к вектору потока Φ_m . При отсутствии потерь в разомкнутой вторичной цепи напряжение на зажимах вторичной цепи равно э. д. с. на зажимах вторичной обмотки трансформатора $U_2 = E_2$.

Вектор активной составляющей тока холостого хода I_c направлен перпендикулярно вектору Φ_m и, складываясь геометрически с вектором I_μ , дает ток холостого хода I_0 .

Напряжение сети U_1 уравнивает э. д. с. первичной обмотки E_1 и компенсирует активные ($R_1 I_0$) и реактивные ($X_1 I_0$) потери при протекании тока холостого хода I_0 . Составляющая напряжения U_1 , уравнивающая э. д. с. первичной обмотки $U'_1 = -E_1$. Вектор U'_1 по величине равен вектору E_1 и направлен вверх перпендикулярно вектору потока Φ_m . Вектор активного падения напряжения $R_1 I_1$ направлен параллельно I_0 , а вектор $X_1 I_0$ — перпендикулярно вектору тока холостого хода. Угол φ_0 определяет сдвиг по фазе напряжения и тока при холостом ходе (коэффициент мощности при холостом ходе равен $\cos \varphi_0$).



Фиг. 126. Кривые намагничивания:

1 — для динамной стали; 2 — для трансформаторной стали.

Ток холостого хода I_0 определяется как гипотенуза в прямоугольном треугольнике и равен

$$I_0 = \sqrt{I_\mu^2 + I_c^2}. \quad (55)$$

Величина намагничивающего тока может быть найдена по формуле

$$I_\mu = \frac{l a \omega + 0,8 n_2 \Delta B_m}{\omega_1 \sqrt{2}}, \quad (56)$$

где l — средняя длина магнитной цепи трансформатора в см;
 $a \omega$ — ампервитки/см, необходимые для получения в сердечнике магнитного потока, достаточного для наведения в первичной обмотке э. д. с., равной приложенному напряжению (напряжению сети U_1);

ω_1 — число витков первичной обмотки;

n_2 — число зазоров в магнитной цепи;

B_m — максимальная индукция в гс;

Δ — величина зазора в см.

При заданных значениях U_1 , ω_1 и f поток Φ_m определяется по формуле (53). Зная поток и сечение сердечника F в см², легко вычислить индукцию B_m ($B_m = \frac{\Phi_m}{F}$) и, наоборот, при конструировании нового трансформатора можно, задаваясь допустимым значением максимальной индукции, определить сечение сердечника. Ампервитки/см, необходимые для создания требуемой индукции, находятся по кривой намагничивания трансформаторной стали (фиг. 126).

Намагничивающий ток (основная составляющая тока холостого хода) тем меньше, чем меньше число зазоров и их величина, т. е. чем лучше конструкция и качество сборки трансформатора. I_μ уменьшается также с уменьшением индукции, так как с уменьшением B_m быстро падает необходимое число ампервитков/см. Однако снижение B_m связано с увеличением сечения сердечника, а следовательно, с увеличением размеров и веса трансформатора. Поэтому в сварочных трансформаторах применяются относительно высокие значения индукции ($B_m = 14\,000 \div 16\,000$ гс).

Активная составляющая тока холостого хода определяется по формуле

$$I_c = \frac{P_{ж}}{U_1}, \quad (57)$$

где $P_{ж}$ — потери энергии в стальном сердечнике.

Потери в стали пропорциональны весу сердечника и зависят от качества стали и от индукции. Для трансформаторов сварочных машин потери в стали близки к 5 вт/кг .

В нормальных силовых трансформаторах ток холостого хода не превышает 5% рабочего тока при полной нагрузке. В трансформаторах для контактной сварки новейшей отечественной конструкции ток холостого хода приближается к 10% рабочего тока, в трансформаторах старых типов он достигает 20% .

Амплитуда магнитного потока при переходе от холостого хода к рабочему режиму практически не изменяется. При холостом ходе этот поток создается намагничивающей силой $I_0 w_1$, при работе с нагрузкой — геометрической суммой намагничивающих сил первичной ($I_1 w_1$) и вторичной ($I_2 w_2$) обмоток трансформатора (фиг. 125, б). Если значения намагничивающих сил разделить на w_1 , то можно построить векторную диаграмму токов (фиг. 125, в), на которой $I'_2 = -I_2 \frac{w_2}{w_1}$ носит название приведенного вторичного тока. Из этой диаграммы видно, что первичный ток трансформатора является геометрической суммой приведенного вторичного тока и тока холостого хода I_0 . В силовых трансформаторах с малым током холостого хода приближенно $I_1 = I'_2$. В трансформаторах машин для контактной сварки пренебрегать током холостого хода при расчетах нельзя. При малом угле β между I'_2 и I_0 можно приближенно считать, что

$$I_1 = I'_2 + I_0$$

или

$$I_2 = (I_1 - I_0) \frac{w_1}{w_2}. \quad (58)$$

На фиг. 125, г приведена полная векторная диаграмма трансформатора с рабочей нагрузкой при учете магнитного рассеяния и активных сопротивлений обмоток по схеме, представленной на фиг. 124, в. Часть э. д. с. вторичной обмотки E_2 затрачивается на преодоление активного сопротивления вторичной обмотки R_2 (вектор $I_2 R_2$, параллельный току I_2) и реактивного сопротивления X_2 , связанного с рассеянием магнитного потока вторичной обмотки (вектор $I_2 X_2$, перпендикулярный к I_2). Напряжение на зажимах вторичной обмотки равно U_2 и смещено по отношению к I_2 на угол φ_2 . Такое же построение для первичной обмотки дает значение вектора первичного напряжения U_1 , смещенного по отношению к току I_1 на угол φ_1 .

Анализ приведенной векторной диаграммы наглядно показывает, что:

а) э. д. с. первичной обмотки E_1 меньше напряжения питающей трансформатор сети, а напряжение на зажимах вторичной обмотки меньше э. д. с. E_2 ;

б) сдвиг фаз между током и напряжением в первичной цепи трансформатора (φ_1) существенно больше сдвига по фазе во вторичной цепи (φ_2).

Следует отметить, что в современных советских конструкциях трансформаторов для контактной сварки благодаря рациональному размещению первичной и вторичной обмоток магнитное рассеяние очень мало и к. п. д. выше 0,95.

✓ § 5. МОЩНОСТЬ, РЕЖИМ РАБОТЫ И НАГРЕВ ТРАНСФОРМАТОРА

Мощность, потребляемая трансформатором из питающей сети, зависит от сопротивления подключенной к нему нагрузки: чем меньше это сопротивление, тем больше протекающий в трансформаторе ток и тем больше, при неизменном напряжении сети, мощность. Часть этой мощности затрачивается на преодоление внутренних сопротивлений самого трансформатора и элементов сварочного контура машины и часть — на полезный нагрев свариваемых деталей.

Для определения мощности контактных сварочных машин используются следующие понятия:

а) потребляемая мощность P — кажущаяся мощность, выраженная в киловольтамперах (*кВа*), забираемая сварочным трансформатором из сети при выполнении той или иной сварочной операции;

б) полезная мощность $P_{св}$ — активная мощность, выраженная в киловаттах (*кВт*), расходуемая на нагрев свариваемых деталей между электродами машины;

в) продолжительная мощность $P_{пр}$ — кажущаяся мощность в киловольтамперах, которую сварочная машина может отдавать при непрерывной нагрузке в течение длительного времени без недопустимого нагрева ее частей;

г) кратковременная мощность $P_{кр}$ — мощность в киловольтамперах, которую машина может отдавать при прерывистом режиме работы при заданной продолжительности включения ($ПВ\%$);

д) номинальная мощность $P_{ном}$ — кратковременная мощность, потребляемая машиной, в киловольтамперах, соответствующая номинальному режиму ее работы, т. е. сварке деталей сечением и толщиной, указанными на щитке или в паспорте машины с производительностью, соответствующей номинальной $ПВ\%$, принятой в расчет при проектировании трансформатора и обозначенной на щитке машины.

Потребляемая машиной кажущаяся мощность в киловольтамперах равна

$$P = U_1 I_1, \quad (59)$$

где U_1 — напряжение в сети и

I_1 — ток, протекающий в первичной обмотке трансформатора.

Элементы электрической и магнитной цепей сварочной машины и ее трансформатора в процессе работы нагреваются. Степень их нагрева зависит от нагрузки машины и от продолжительности включения ($ПВ\%$). При непрерывной работе машины ($ПВ=100\%$) температура в любом ее

нагреваемом элементе изменяется по плавной кривой A (фиг. 127). Через некоторое время после начала нагрева достигается установившаяся температура T_{\max} , при которой потери тепла на теплопередачу и лучеиспускание равняются полному количеству тепла, выделяемого в рассматриваемом элементе машины. При неизменных условиях работы и прерывистом включении машины температура изменяется по кривой B . При этом периоды нагрева (t_{cb}) чередуются с периодами интенсивного охлаждения машины (t_n). Установившаяся температура при прерывистом нагреве $T'_{\max} < T_{\max}$.

Если температура T_{\max} нигде не превышает установленных пределов (см. § 6), то соответствующая мощность равна P_{np} . Ей соответствует ток продолжительной работы (продолжительный ток) I_{np} . Общее количество тепла в $вт\text{-сек}$, выделяемое в любом элементе машины за отрезок времени $t = t_{cb} + t_n$ при непрерывной работе ($PB = 100\%$), равно $I_{np}^2 R t$. При прерывистом включении общее количество тепла, выделяемое за тот же отрезок времени t , составит $I_{кр}^2 R t_{cb}$, где $I_{кр}$ — ток при повторно-кратковременной работе (кратковременный ток).

Одинаковый нагрев при повторно-кратковременной и непрерывной работе будет получен при условии

$$I_{np}^2 R t = I_{кр}^2 R t_{cb},$$

откуда

$$I_{кр} = I_{np} \sqrt{\frac{t}{t_{cb}}} \quad \text{и} \quad I_{np} = I_{кр} \sqrt{\frac{t_{cb}}{t}}, \quad (60)$$

где

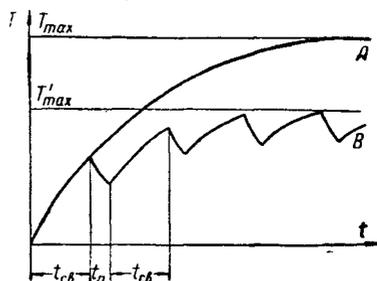
$$\sqrt{\frac{t}{t_{cb}}} > 1.$$

По аналогии можно доказать, что

$$P_{кр} = P_{np} \sqrt{\frac{t}{t_{cb}}} \quad \text{и} \quad P_{np} = P_{кр} \sqrt{\frac{t_{cb}}{t}}. \quad (61)$$

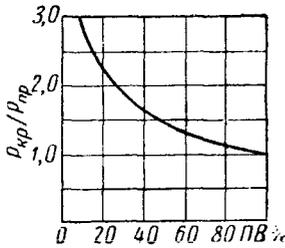
Чем меньше $PB\%$, тем больше $\sqrt{\frac{t}{t_{cb}}}$ и тем больше $I_{кр}$ и $P_{кр}$, допустимые без опасного перегрева машины и трансформатора. На фиг. 128 дан график зависимости отношения $P_{кр}/P_{np}$ и соответственно $I_{кр}/I_{np}$ от $PB\%$.

Зная номинальную продолжительность включения $PB\%$ (обычные ее значения приведены в § 2) и номинальную кратковременную мощность контактной машины (выпускаемые в СССР контактные машины маркируются по этой мощности, например, МП-75 — машина точечная пневматическая номинальной мощностью 75 kva), легко определить продолжительную мощность P_{np} . Исходя из величины P_{np} , можно установить



Фиг. 127. Кривые изменения температуры при непрерывном и прерывистом нагреве.

кратковременную мощность машины, допустимую по условиям ее нагрева, при любом режиме работы (при любом значении $PB^0/0$). Методика этих расчетов пояснена следующим примером.



Фиг. 128. Зависимость отношения кратковременной и продолжительной мощностей от продолжительности включения ($PB^0/0$).

$PB = 40\%$. Тогда допустимая длительность одного сварочного цикла составит $t = \frac{3}{0,40} = 7,5$ сек. Допустимая часовая производительность машины равна $N = \frac{3600}{7,5} = 480$ сварок.

Для нормальной работы сварочной машины необходимо, чтобы ее трансформатор обладал как достаточной кратковременной, так и достаточной продолжительной мощностью. Если кратковременная мощность мала, то сварочный процесс идет замедленно и вяло. Например, при стыковой сварке процесс оплавления нестабилен или не подерживается вовсе. При недостаточной продолжительной мощности трансформатора (или машины в целом) сварка протекает нормально, но трансформатор (или элементы сварочного контура машины) нагревается выше допустимых пределов, что ведет к необходимости искусственного удлинения пауз между последовательными сварочными операциями и, как следствие, к снижению производительности труда.

Повышение кратковременной мощности машины возможно повышением э. д. с. (E_2) вторичной обмотки трансформатора или уменьшением сопротивления сварочной цепи (см. гл. IX). В обоих случаях ток в сварочной цепи (I_2) растет. Некоторое повышение E_2 может быть достигнуто уменьшением падения напряжения в сети, питающей сварочный трансформатор (путем уменьшения длины или увеличения сечения проводов, соединяющих трансформатор с источником его питания). Увеличение E_2 за счет уменьшения числа витков первичной обмотки сварочного трансформатора (т. е. уменьшения коэффициента трансформации) обычно не дает положительных результатов, так как при этом растет индукция в сердечнике трансформатора (см. § 6) и резко увеличивается ток холостого хода; рост потерь в самом трансформаторе при этом может почти полностью свести на нет эффект от повышения э. д. с. Для увеличения продолжительной мощности трансформатора необходимо улучшить его охлаждение.

Определение допустимого режима работы контактной машины

Точечная машина номинальной мощностью 40 ква при $PB_{ном} = 20\%$ должна быть использована при сварке деталей с потреблением $P_{кр} = 30$ ква. Определить производительность машины, если длительность включения тока при сварке каждой точки $t_{св} = 3$ сек.

Продолжительная мощность машины равна по формуле (61 и 52)

$$P_{пр} = P_{ном} \sqrt{\frac{PB_{ном}}{100}} = 17,8 \text{ ква.}$$

При $P_{кр} = 30$ ква $\frac{P_{кр}}{P_{пр}} = \frac{30}{17,8} = 1,68$ и по фиг. 128

§ 6. РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

Исходными данными для такого расчета являются: $P_{ном}$ — номинальная кратковременная мощность трансформатора, $PV_{ном}^0$ — номинальная продолжительность включения, U_1 — напряжение в сети, питающей машину, E_2 — э. д. с. вторичной обмотки, а также пределы и число ступеней регулирования трансформатора (при ступенчатом его регулировании — см. § 7). $P_{ном}$ и E_2 обычно задаются для случая включения трансформатора на предпоследней ступени, что при включении на последней, самой высокой ступени (E_2 имеет максимальное значение) обеспечивает некоторый резерв мощности.

Расчет сварочного трансформатора начинается с определения размеров сердечника. Сечение сердечника (в $см^2$) определяется по формуле

$$F_{ж} = k \frac{E_2 \cdot 10^8}{4,44 f \omega_2 B_m}, \quad (62)$$

где E_2 — расчетная э. д. с. вторичной обмотки трансформатора в в;

f — частота переменного тока (обычно 50 гц);

ω_2 — число витков вторичной обмотки (один, реже два);

B_m — максимальная допустимая индукция в гауссах (гс);

k — коэффициент, учитывающий наличие между тонкими стальными листами, из которых собирается сердечник, изоляции и воздушных зазоров.

Допустимая индукция B_m зависит от марки стали. При использовании легированной трансформаторной стали в трансформаторах для контактной сварки максимальная индукция обычно лежит в пределах 14 000—16 000 гс.

При хорошем стягивании сердечника из листов толщиной 0,5 мм, изолированных лаком, $k = 1,08$; при бумажной изоляции k может повыситься до 1,12.

В броневом трансформаторе, имеющем разветвленную магнитную цепь (см. фиг. 121, б), расчетное сечение, полученное по формуле (62), относится к центральному стержню, пропускающему полный магнитный поток. Сечение остальных участков магнитопровода, пропускающих половинный поток, уменьшается в 2 раза.

Сечение каждого стержня трансформатора обычно представляет собой прямоугольник с отношением сторон от 1:1 до 1:3.

Число витков первичной обмотки зависит от пределов регулирования вторичного напряжения трансформатора. Это регулирование в большинстве случаев достигается изменением коэффициента трансформации путем включения большего или меньшего числа витков первичной обмотки (см. § 7). Например, при первичном напряжении 220 в и максимальном значении $E_2 = 5$ в коэффициент трансформации равен 44 и при одном витке вторичной обмотки первичная обмотка должна иметь 44 витка; при необходимости в понижении E_2 (в процессе регулирования мощности трансформатора) до 4 в коэффициент трансформации растет до 55, для чего требуется 55 витков первичной обмотки. Обычно пределы регулирования контактных машин (отношение $\frac{E_{2\max}}{E_{2\min}}$) изменяются от 1,5 до 2

(в отдельных случаях эти пределы еще шире). Чем шире пределы регулирования трансформатора (чем меньше $E_{2\min}$ при неизменном значении $E_{2\max}$), тем больше витков должна иметь его первичная обмотка и тем соответственно больше расход меди для изготовления трансформатора. В связи с этим более широкие пределы регулирования применяются в машинах универсального типа (это расширяет возможность их использования на производстве) и более узкие — в специализированных машинах, предназначенных для выполнения какой-либо определенной сварочной операции.

Зная величину E_2 для номинальной ступени и пределы регулирования, легко подсчитать полное число витков первичной обмотки по формуле

$$\omega_1 = \frac{U_1}{E_{2\min}}. \quad (63)$$

При двух витках вторичной обмотки полученное значение ω_1 удваивается.

Число ступеней регулирования мощности трансформатора для контактной сварки обычно лежит в пределах 6—8 (иногда оно увеличивается до 16 и даже 64). Число витков, включаемых на каждой ступени регулирования, подбирается таким образом, чтобы отношение между э. д. с. для любых двух смежных ступеней было примерно одинаковым (см. пример расчета трансформатора).

Сечение провода первичной обмотки рассчитывается по продолжительному току на номинальной ступени I_{1np} . Предварительно определяется кратковременный номинальный ток по формуле

$$I_{1кр} = \frac{P_{ном}}{U_1}. \quad (64)$$

Продолжительный ток вычисляют по номинальному значению $PВ^0/0$, пользуясь формулой (60) или графиком на фиг. 128. Сечение провода вычисляется по формуле

$$F_1 = \frac{I_{1np}}{j_{1np}}, \quad (65)$$

где j_{1np} — допустимая продолжительная плотность тока в первичной обмотке. Для медных проводов первичной обмотки с естественным (воздушным) охлаждением $j_{1np} = 1,4 \div 1,8 \text{ а/мм}^2$. При плотном прилегании первичной обмотки к элементам вторичного витка, имеющим интенсивное водяное охлаждение, плотность тока в первичной обмотке может быть существенно повышена (до $2,5 \div 3,5 \text{ а/мм}^2$) за счет лучшего их охлаждения. Как указывалось выше, сечение витков первичной обмотки, включаемых только на низких ступенях регулирования (при относительно малом токе), может быть уменьшено по сравнению с сечением витков, пропускающих максимальный ток, при включении на последней ступени.

Необходимое сечение вторичного витка определяется продолжительным током I_{2np} во вторичной цепи машины. Приближенно $I_{2np} = nI_{1np}$,

где n — коэффициент трансформации на номинальной ступени включения трансформатора. Сечение вторичного витка равно

$$F_2 = \frac{I_{2np}}{j_{2np}}. \quad (66)$$

В зависимости от конструкции и способа охлаждения в медном вторичном витке могут быть допущены следующие плотности тока: в неохлаждаемом гибком витке, набранном из медной фольги, — $2,2 \text{ а/мм}^2$; в витке с водяным охлаждением — $3,5 \text{ а/мм}^2$; в неохлаждаемом жестком витке — $1,4$ — $1,8 \text{ а/мм}^2$. С увеличением плотности тока уменьшается вес меди, но растут потери в ней и понижается к. п. д. трансформатора.

Число витков первичной и вторичной обмоток трансформатора и их сечения (с учетом размещения изоляции) определяют размеры и форму окна в сердечнике трансформатора, в котором должны разместиться элементы обмоток. Это окно обычно проектируется с отношением сторон от $1:1,5$ до $1:3$ (в примере расчета $100 \times 180 \text{ мм}$) (см. фиг. 129, б). Вытянутая форма окна позволяет разместить обмотки, не прибегая к большой высоте катушек, ведущей к увеличению расхода меди в связи с заметным удлинением наружных витков обмотки. Размеры окна и ранее найденные сечения стержней сердечника полностью определяют форму последнего.

Следующим этапом в расчете трансформатора является определение его тока холостого хода. Для этого предварительно подсчитывается вес сердечника и определяются активные потери энергии в нем $P_{жс}$. Далее активная составляющая тока холостого хода вычисляется по формуле (57), а его реактивная составляющая (намагничивающий ток I_{μ}) — по формуле (56). Суммарный ток холостого хода определяется по формуле (55).

Активное сопротивление первичной и вторичной обмоток трансформатора определяется по формуле

$$R = m\rho_{\text{м}} \frac{l}{F}, \quad (67)$$

где $\rho_{\text{м}}$ — удельное сопротивление материала обмотки при эксплуатационной ее температуре (порядка 80°C);

F — площадь поперечного сечения элемента обмотки;

l — длина соответствующей обмотки (первичной или вторичной);

m — коэффициент поверхностного эффекта, который может приниматься равным $1,5$ (при частоте $f = 50 \text{ гц}$).

Активные потери мощности в обмотках трансформатора определяются по формуле

$$P_{\text{м}} = RI_{\text{кр}}^2. \quad (68)$$

Сумма активных потерь в стали сердечника ($P_{жс}$) и в меди ($P_{\text{м}}$) определяет нагрев сварочного трансформатора. Потери $P_{жс}$ и $P_{\text{м}}$ используются при расчете водяного охлаждения трансформатора. Они же определяют к. п. д. трансформатора

$$\eta = \frac{U_2 I_{2\text{кр}} \cos \varphi_2}{U_2 I_{2\text{кр}} \cos \varphi_2 + P_{жс} + P_{\text{м}}}, \quad (69)$$

где $I_{2кр}$ — номинальный кратковременный ток во вторичной цепи машины;

$\cos \varphi_2$ — коэффициент мощности вторичной цепи машины (см. фиг. 125, з);

U_2 — напряжение на зажимах вторичного витка трансформатора (в связи с наличием потерь во вторичном витке $U_2 < E_2$).

Ниже приводится пример расчета трансформатора.

Пример расчета сварочного трансформатора

Исходные данные: номинальная мощность при включении на предпоследней ступени $P_{ном} = 200$ ква; $ПВ_{ном} = 250\%$; $U_1 = 220$ в; напряжение холостого хода во вторичной цепи (э. д. с.) равно 6,0—10,0 в; число ступеней регулирования равно 8.

Принимаем напряжение холостого хода на предпоследней (номинальной) ступени 9,4 в.

Сечение сердечника при $B_m = 14\,000$ гс, частоте 50 гц, $k = 1,08$ и одном витке вторичной обмотки по формуле (62) равно

$$F_{ж} = \frac{1,08 \cdot 9,4 \cdot 10^8}{4,44 \cdot 50 \cdot 1 \cdot 14\,000} = 326 \text{ см}^2.$$

Принимаем броневого типа трансформатора. Его наружные стержни будут иметь сечение $326/2 = 163 \text{ см}^2$.

Полное число витков первичной обмотки по формуле (63)

$$\omega_1 = \frac{220}{6,0} \approx 36.$$

Число витков при включении трансформатора на номинальной ступени

$$\omega_{ном} = \frac{220}{9,4} = 24.$$

Число витков по отдельным ступеням принимаем равным

Ступень включения	1	2	3	4	5	6	7	8
Число витков	36	34	32	30	28	26	24	22

Кратковременный ток в первичной обмотке по формуле (64)

$$I_{1кр} = \frac{200\,000}{220} = 910 \text{ а.}$$

Продолжительный ток в первичной обмотке по формуле (60)

$$I_{1пр} = I_{1кр} \sqrt{\frac{ПВ}{100}} = 910 \sqrt{0,25} = 455 \text{ а.}$$

Принимаем дисковую первичную обмотку с ее размещением между интенсивно охлаждаемыми элементами вторичного витка. При этом допустимая плотность тока равна 3,0 а/мм². Тогда сечение провода первичной обмотки по формуле (65) равно

$$F_1 = \frac{455}{3,0} = 152 \text{ мм}^2.$$

Приближенно

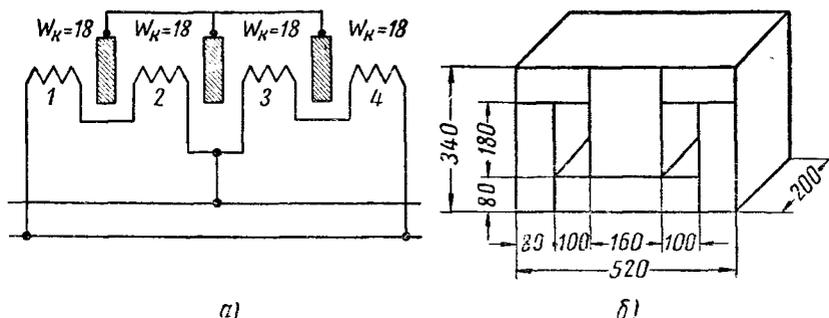
$$I_{2пр} = 155 \frac{220}{9,4} = 10\,700 \text{ а.}$$

Сечение медного вторичного витка при его интенсивном водяном охлаждении определяется по формуле (66)

$$F_n = \frac{I_{2np}}{j_2} = \frac{10700}{3,5} = 3060 \text{ мм}^2.$$

Принципиальная схема размещения катушек первичной обмотки и элементов вторичного витка приведена на фиг. 129, а. Вторичный виток образован тремя параллельно соединенными элементами, вырезанными из медного листа толщиной 12 мм, сечением 12×85 мм каждый (площадь сечения витка 12·85×3 = 3060 мм²).

На схеме катушки первичной обмотки 2 и 3 и соответственно 1 и 4 соединяются между собой параллельно. Необходимое при этом сечение провода в каждой катушке первичной обмотки составляет $\frac{152}{2} = 76 \text{ мм}^2$. Делаем первич-



Фиг. 129. К расчету сварочного трансформатора.

ную обмотку из медной шины сечением 3×25 = 75 мм². При межвитковой изоляции прессшпаном толщиной 1 мм общая высота каждой катушки, состоящей из 18 витков, составит 18(3 + 1) = 72 мм.

Ширина окна сердечника при среднем зазоре между катушками и элементами вторичного витка, равном 5 мм, составит

$$b = 3 \cdot 12 + 4 \cdot 25 + 8 \cdot 5 = 176 \text{ мм}.$$

Принимаем окно сердечника размером 100×180 мм. Размеры сердечника приведены на фиг. 129, б.

Вес стали в сердечнике равен

$$G_{ж} = (0,52 \cdot 0,34 - 2 \cdot 0,1 \cdot 0,18) \cdot 0,2 \cdot 7850 = 220 \text{ кг}.$$

Потери в стали составляют

$$P_{ж} = 220 \cdot 5 = 1100 \text{ вт}.$$

Активная составляющая тока холостого хода по формуле (57) равна

$$I_c = \frac{1100}{220} = 5 \text{ а}.$$

Магнитизирующий ток I_μ определяется по формуле (56).

Средняя длина магнитной цепи трансформатора

$$l = 2(18 + 8) + 2(10 + 8) = 88 \text{ см}.$$

При П-образной штамповке листов число зазоров в магнитной цепи $n_3 = 2$. Величину зазора принимаем равной 0,02 см. Для трансформаторной стали при

индукции $B_m = 14\,000$ гс необходимое число ампервитков на 1 см длины магнитопровода составляет 21 (см. фиг. 126). Подставляя полученные значения в формулу (56), определяем намагничивающий ток

$$I_\mu = \frac{88 \cdot 21 + 0,8 \cdot 2 \cdot 0,02 \cdot 14\,000}{24 \sqrt{2}} = 68 \text{ а.}$$

Ток холостого хода по формуле (54) равен

$$I_0 = \sqrt{5^2 + 68^2} = 68 \text{ а.}$$

Ток холостого хода составляет по отношению к номинальному первичному току $\frac{68}{910} 100 = 7,5\% < 10\%$.

Активное сопротивление первичной обмотки при средней длине каждого витка, равной 122 см (1,12 м), и коэффициенте поверхностного эффекта 1,5 составляет при включении трансформатора на номинальной ступени (для $T = 80^\circ$ $\rho_m = 0,02$ о.м.·м²/м)

$$R_1 = 1,5 \cdot 0,02 \frac{24 \cdot 1,12}{152} = 0,0053 \text{ о.м.}$$

Активное сопротивление вторичного витка (при $T = 80^\circ$) при средней его длине 1,12 м

$$R_2 = 1,5 \cdot 0,02 \frac{1,12}{3060} = 0,000011 \text{ о.м.}$$

Потери в меди трансформатора будут равны

$$P_m = 0,0053 \cdot 910^2 + 0,000011 \cdot 21400^2 = 9400 \text{ вт,}$$

где 21 400 а — номинальный кратковременный ток в сварочной цепи.

Общие потери в стали и меди составляют $1100 + 9400 = 10\,500$ вт.

В течение 1 часа работы трансформатора в нем выделяется (в стали и меди) количество тепла, равное (с учетом $PB = 25\%$)

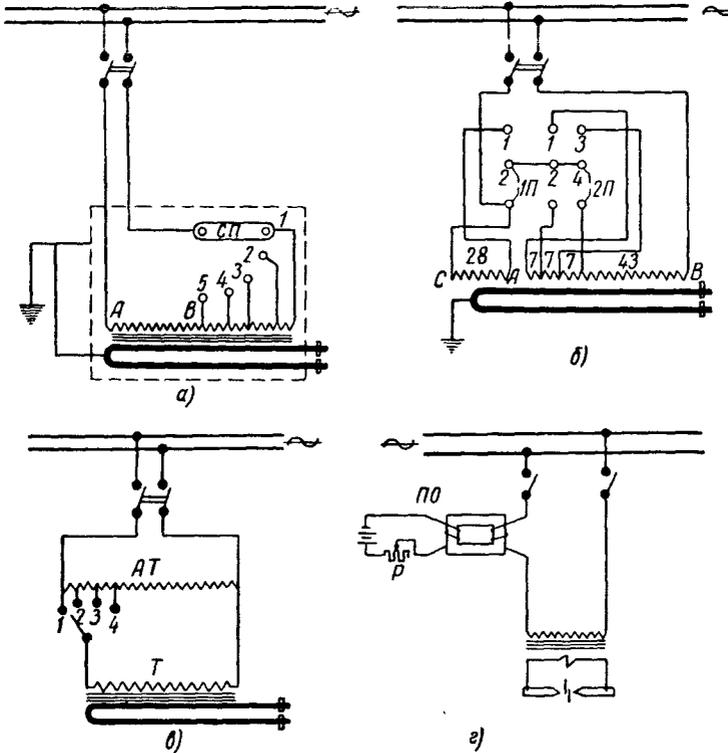
$$Q = 0,24 \cdot 10\,500 \cdot 0,25 \cdot 3600 = 2\,270\,000 \text{ кал/час.}$$

Это количество тепла может быть положено в основу расчета системы водяного охлаждения (оно достаточно для нагрева 10 л воды до $T = 22,7^\circ$). При этом необходимо иметь в виду, что часть тепла отводится за счет естественного охлаждения окружающим воздухом.

✓ § 7. РЕГУЛИРОВАНИЕ МОЩНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРА

На практике применяется ступенчатое и плавное регулирование мощности контактных машин. Ступенчатое регулирование является наиболее простым и широко распространенным способом и обычно достигается секционированием первичной обмотки трансформатора. Как указывалось выше, при включении в сеть, питающую трансформатор, того или иного числа витков первичной обмотки изменяются коэффициент трансформации и э. д. с. вторичной обмотки (при уменьшении э. д. с. понижается ток в сварочной цепи машины и, как следствие, уменьшается мощность). Принципиальная схема трансформатора с таким регулированием показана на фиг. 130, а. Первичная обмотка трансформатора имеет ряд отпаек, (1—5), соединенных с клеммами секционного переключателя СП. При включении на клемму 1 током обтекаются все витки первичной обмотки (нижняя ступень включения); этому соответствует минимальное напряжение во вторичной цепи трансформатора. При включении на клемму 5

(высшая ступень) э. д. с. E_2 будет иметь максимальное значение. В последнем случае полное напряжение сети (например 380 в) подводится



Фиг. 130. Схемы регулирования мощности сварочного трансформатора:

а — одноножевым секционным переключателем; б — двухножевым переключателем; в — автотрансформатором; з — дросселем с подмагничиванием.

к участку обмотки AB . При этом между точками A и C , как в автотрансформаторе, появится напряжение U_{AC} , превышающее напряжение сети,

$$U_{AC} = \frac{w_1}{w_{1 \min}} U_1, \quad (70)$$

где w_1 — общее число витков первичной обмотки;

$w_{1 \min}$ — число витков в секции AB и

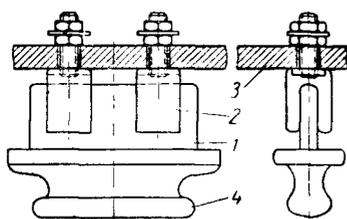
U_1 — напряжение сети.

В машинах для контактной сварки отношение $\frac{w_1}{w_{1 \min}}$ (коэффициент регулирования) иногда превышает 2. При этом в первичной обмотке могут возникнуть опасные напряжения, значительно превышающие напряжение сети. Для того, чтобы этого не было, в первичной обмотке трансформатора при отношении $\frac{w_1}{w_{1 \min}} > 1,5$ применяется разрыв (точка A на фиг. 130, б).

В связи с этим секционный переключатель имеет два ножа — *1П* и *2П*. При установке обоих ножей в положение *1* током обтекается вся первичная обмотка — трансформатор включен на первую ступень. При установке ножа *1П* в положение *2* левая группа витков (*28*) вовсе отключается. Если при этом нож *2П* устанавливается в положение *4* (высшая ступень), то включенными оказываются только *43* витка. При этом между точками *A* и *B* возникает напряжение

$$U_{AB} = \frac{(43 + 3 \cdot 7)}{43} U_1 = 1,49 U_1 < 1,5 U_1.$$

Нагрев свариваемых деталей при контактной сварке обычно может регулироваться двумя способами: изменением силы тока (мощности)



Фиг. 131. Ножевой переключатель.

и изменением длительности его включения. При плавном регулировании длительности нагрева нет необходимости в особенно мягком регулировании мощности трансформатора — число ступеней его регулирования ограничивается 6—8. При непрерывных процессах (например, в трубосварочных машинах) длительность включения не регулируется, в связи с чем число ступеней регулирования мощности должно быть увеличено (например, в трубосварочной машине АШТ-60 оно равно 64).

В случае затрудненного подвода тока к сварочному трансформатору, например при его вращении, мощность регулируется дополнительным автотрансформатором *АТ* (фиг. 130, *в*), с помощью которого изменяется напряжение, питающее первичную обмотку трансформатора *Т*, в этом случае не секционированную. При такой схеме вращающийся трансформатор соединяется с неподвижным автотрансформатором только двумя проводами, что существенно упрощает коммутацию тока.

Ступенчатое регулирование производится специальными устройствами — секционными переключателями. В машинах для контактной сварки применяются штепсельные, ножевые и вращающиеся переключатели. Штепсельный переключатель часто заклинивается и трудно переставляется — его применение ограничивается машинами малой мощности. Значительно целесообразнее применять ножевой переключатель (фиг. 131), в котором плоский нож *1* вводится в зазор между пружинящими медными контактными пластинами *2*, укрепленными на плите *3* из изоляционного материала. Нож закреплен в деревянной или текстолитовой ручке *4*. Такие переключатели широко применяются в серийных машинах.

В машинах большой мощности (более 150—200 *кВа*) штепсельные и ножевые переключатели становятся громоздкими вследствие значительных токов, на которые приходится рассчитывать их контакты. В этом случае могут применяться вращающиеся переключатели, в которых нож укреплен на валике, вращающемся с помощью относительно длинной

рукоятки. При вращении ножа он поочередно замыкает пружинящие контакты переключателя.

Плавное (бесступенчатое) регулирование мощности машин для контактной сварки производится изменением электрических параметров машины или изменением формы кривой тока. В первом случае возможно включение в первичную или вторичную цепь машины плавное регулируемое активного или индуктивного сопротивления (реостата или дросселя). Включение реостата приводит к бесполезному расходу энергии, и поэтому нецелесообразно. Схема регулирования дросселем (К. К. Хренов и В. В. Александров) показана на фиг. 130, з. Дроссель имеет подмагничивающую обмотку $ПО$, соединенную с маломощным источником постоянного тока через регулируемое сопротивление P . При уменьшении сопротивления P увеличиваются подмагничивающий ток и магнитный поток в сердечнике дросселя. При этом понижается его индуктивное сопротивление — ток в сварочном трансформаторе растет. Таким образом, реостат P позволяет с незначительной затратой электрической энергии регулировать большую мощность сварочного трансформатора. Недостаток регулирования дросселем — понижение $\cos \varphi$ установки.

Сущность регулирования изменением формы кривой тока заключается в том, что сварочный трансформатор питается от сети через специальное устройство (прерыватель), позволяющее в течение каждого полупериода переменного тока иметь паузы регулируемой длительности, во время которых ток отключается. Чем длиннее эти паузы, тем меньше эффективное значение тока и тем соответственно меньше мощность, развиваемая машиной. Преимущество такого способа регулирования мощности (широко применяемого в промышленности) — отсутствие дополнительных потерь энергии в регулирующем устройстве (см. § 2 гл. XIII).

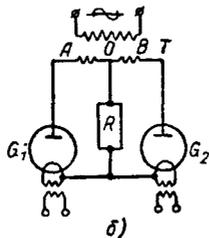
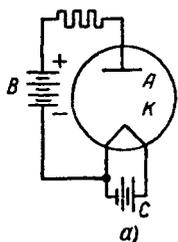
§ 8. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ИОННЫХ ПРИБОРОВ

Во многих современных машинах для контактной сварки длительность включения сварочного тока ограничивается десятками и даже сотыми долями секунды, поэтому включение тока в этих машинах требует применения быстродействующих автоматических устройств. В связи с этим в контактных машинах все шире применяются ионные приборы, простейшим из которых является газотрон. Газотрон представляет собой стеклянный баллон с двумя впаянными в него электродами — анодом и катодом. После откачки баллона до высокого вакуума он заполняется парами ртути или небольшим количеством инертного газа (аргона, неона). Давление газа или пара в ионном приборе не превышает 1 мм рт. ст. Катод газотрона нагревается электрическим током.

При включении газотрона в электрическую цепь (фиг. 132, а) она фактически разомкнута. Катод K , соединяемый с плюсом источника постоянного тока B , является одним концом этой разомкнутой цепи, анод A , соединяемый с минусом, — другим. Чтобы замкнуть цепь, нужно создать поток электронов через межэлектродное пространство. Для этого необходимо выделение электронов с поверхности катода и их притяжение к аноду. При достаточном нагреве катода его поверхность начинает

излучать (эмитировать) электроны (термоэлектронная эмиссия). Показанная на фиг. 132, *a* батарея *C* служит для нагрева катода. Катод изготавливается из теплостойкого материала, например, никеля, покрываемого специальной оксидной пленкой, увеличивающей его способность к термоэлектронной эмиссии.

Анод представляет собой пластинку нихрома, вольфрама, графита или другого теплостойкого материала. Если газотрон с нагретым катодом, излучающим электроны, включен в цепь батареи *B*, как показано на фиг. 132, *a*, то положительно заряженный анод начинает притягивать отрицательно заряженные электроны, и в газотроне возникает электрический ток (так называемый анодный ток). Хотя электроны переносят отрицательные заряды от катода (минуса) к аноду (плюсу), направлением тока, как это общепринято в электротехнике, считается направление от плюса (анода) к минусу (катоде).



Фиг. 132. Схема газотрона (*a*) и газотронного выпрямителя (*b*).

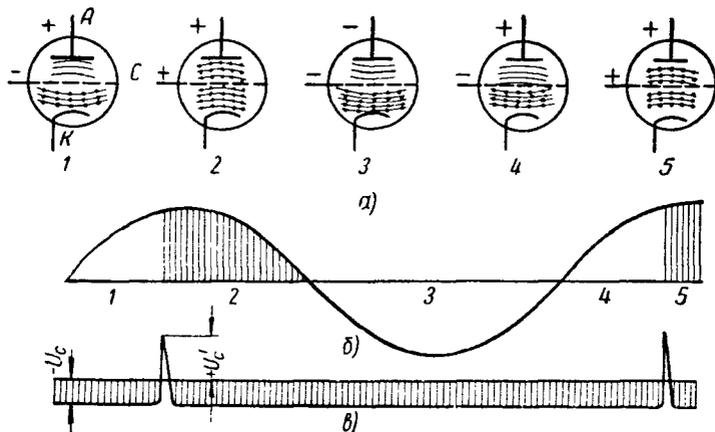
Электронны, двигаясь с огромной скоростью от катода к аноду, сталкиваются в газонаполненном (ионном) приборе с молекулами газа или паров ртути. При этом из молекул газа (или пара) вырываются отдельные электроны — происходит ионизация этих молекул. Молекулы, лишенные электронов (ионы), оказываются заряженными положительно. Положительно заряженные ионы вследствие их относительно большой массы медленно (по сравнению с электронами) двигаются к катоду; между анодом и катодом образуется дуговой разряд, вызывающий характерное голубое свечение при протекании тока в газонаполненных приборах и, в том числе, в газотроне. Межэлектродное пространство при этом равномерно заполнено положительными и отрицательными зарядами — ионами и электронами (за исключением области, непосредственно прилегающей к аноду, в которой ионы практически отсутствуют, так как они отталкиваются от положительно заряженного анода). Благодаря равномерному распределению зарядов в межэлектродном пространстве, электроны относительно легко проникают к аноду — внутреннее сопротивление ионного прибора мало (падение напряжения в газотроне при его работе обычно лежит в пределах 14—18 в и почти не зависит от силы тока).

Газонаполненные приборы, в которых происходит ионизация межэлектродного пространства, носят общее название ионных приборов в отличие от вакуумных или электронных приборов. В последних разрежение газа столь значительно, что вероятность столкновения электронов с молекулами газа ничтожна, и весь электрический ток осуществляется полностью за счет переноса свободных электронов от катода к аноду.

Если батарею *B*, питающую анодную цепь газотрона, соединить с ним так, чтобы на аноде оказался отрицательный потенциал, то отри-

цательно заряженные электроны будут отталкиваться от анода и ток через газотрон протекать не будет. Таким образом, газотрон обладает односторонней проводимостью.

При включении газотрона в цепь переменного тока в течение одного полупериода на аноде будет положительный потенциал, и газотрон пропустит ток. В течение следующего полупериода потенциал на аноде станет отрицательным, и ток прекратится — газотрон, как и все электронные и ионные приборы, является выпрямителем. При включении двух газотронов по схеме, изображенной на фиг. 132, б, осуществляется двухполупериодное выпрямление перемен-



Фиг. 133. Схема действия тиатрона.

ного тока. Действительно, во время одного полупериода ток потечет во вторичной цепи трансформатора T через обмотку AO , внешнюю нагрузку (сопротивление R) и левый газотрон G_1 , а в течение следующего полупериода направление тока в трансформаторе изменится, и он потечет через обмотку OB , сопротивление R и газотрон G_2 . В обоих случаях во внешней цепи (сопротивление R) потечет ток одного направления.

Газотрон с третьим электродом — сеткой называется тиатроном. Сетка C размещается между анодом A и катодом K , как схематически показано на фиг. 133, а. Допустим, что тиатрон включен в цепь переменного тока, создающего в начальный момент времени I положительный потенциал на аноде A (фиг. 133, а1). Потенциал на аноде изменяется по обычной синусоиде переменного тока (фиг. 133, б). Сетка тиатрона C соединена с независимым источником напряжения, не показанным на схеме. Катод нагревается независимым источником тока. Пусть в момент времени I на сетке имеется отрицательный по отношению к катоду K потенциал — U_c (фиг. 133, в). Если бы сетка в тиатроне отсутствовала, то при положительном потенциале на аноде в анодной цепи возник бы ток (как в газотроне). При отрицательном потенциале на сетке эмитируемые катодом электроны отталкиваются

от нее, не проникая к аноду — тиратрон при этом заперт, несмотря на наличие положительного потенциала на аноде. Взаимодействие анода и сетки в этом случае схематически показано на фиг. 133, *a1*. Точками обозначены свободные электроны в межэлектродном пространстве, а дугами условно показаны действующие на электроны силы (на фиг. 133, *a1* электроны отталкиваются от сетки). Если теперь дать на сетку положительный потенциал $+U'_c$ (фиг. 133, *в*), то ее запирающее действие мгновенно прекратится, и поток электронов свободно устремится к аноду (фиг. 133, *a2*), ионизируя (как в газотроне) межэлектродное пространство. Вновь изменяя потенциал сетки на отрицательный, нельзя приостановить протекание анодного тока до тех пор, пока анод остается положительным (до конца положительного полупериода переменного тока). Это объясняется тем, что положительные ионы, появившиеся в межэлектродном пространстве тиратрона в момент зажигания дуги, обволакивают сетку и нейтрализуют ее отрицательный потенциал; электроны свободно проходят через отверстия в сетке, поддерживая нормальный анодный ток. Отрицательная полуволна переменного тока 3 (фиг. 133, *б*) не пройдет через тиратрон, обладающий, так же как ранее рассмотренный газотрон, односторонней проводимостью (фиг. 133, *a3*). К началу следующей положительной полуволны 4 вследствие того, что тиратрон в конце полуволны 2 погас и произошла деионизация межэлектродного пространства, запирающее действие отрицательно заряженной сетки восстанавливается, и, несмотря на положительный потенциал на аноде (фиг. 133, *б*), анодный ток невозможен (фиг. 133, *a4*). Если вновь изменить потенциал на сетке, то при положительном потенциале анода тиратрон отперется и в нем начнет протекать анодный ток (фиг. 133, *a5*).

Изменяя момент повышения потенциала сетки, можно зажигать тиратрон в любой точке положительной полуволны тока. *Сетка в тиратроне позволяет замыкать его анодную цепь* (зажигать тиратрон) *в заданный момент времени, но не позволяет управлять величиной тока в этой цепи* (последнее возможно только в трехэлектродных вакуумных, так называемых электронных лампах). Таким образом, *тиратрон является электрическим вентиляем*. При включении тиратрона в цепь переменного тока его управляемость восстанавливается после каждой полуволны, соответствующей отрицательному потенциалу на аноде.

Потенциал сетки, необходимый для зажигания тиратрона, зависит от величины анодного напряжения. Чем выше анодное напряжение, тем более отрицательной должна быть сетка по отношению к катоду для того, чтобы воспрепятствовать протеканию анодного тока, т. е. зажиганию тиратрона. Зависимость анодного напряжения, зажигающего тиратрон, от потенциала сетки называется *характеристикой зажигания* (или *пусковой характеристикой*). На фиг. 134, *a* приведена такая характеристика для одного из тиратронов, рассчитанного на анодный ток до 4 *a*. Из диаграммы видно, что при анодном напряжении 600 *v* зажигание тиратрона произойдет при отрицательном потенциале сетки, равном 5 *v*. При анодном напряжении 200 *v* потенциал зажигания повысится до 3,5 *v*.

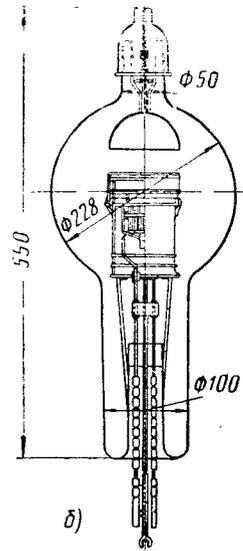
Пусковая характеристика тиратрона непостоянна и зависит от температуры внутри прибора, частоты тока и других причин.

Тиратроны обычно рассчитываются на относительно небольшой анодный ток (редко более 40 a). Фиг. 134, б дает представление о размерах и форме большого тиратрона (анодный ток 40 a).

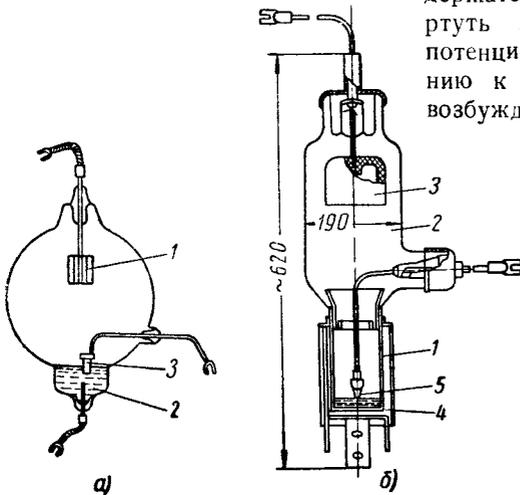
В настоящее время в контактных машинах тиратроны применяются во вспомогательных цепях управления, в которых ток не превышает $10\text{--}15 \text{ a}$. Для включения основных цепей машины (первичной цепи сварочного трансформатора) широко используются управляе-

мый ионный прибор с жидким катодом — так называемый игнитрон. На фиг. 135, а показана принципиальная схема игнитрона. В стеклянный сосуд, из которого предварительно откачан воздух, введен железный или графитовый анод 1. В нижнюю часть сосуда наливается ртуть, образующая катод 2.

Третьим электродом служит введенный через боковое отверстие поджигатель 3 (кристалл карборунда, укрепленный в металлическом держателе), частично погруженный в ртуть катода. При положительном потенциале поджигателя по отношению к катоду между ними легко возбуждается дуга, ионизирующая межэлектродное пространство игнитрона и ведущая к мгновенному его зажиганию (при наличии положительного потенциала на аноде). Поджигание игнитрона занимает не более $0,001 \text{ сек}$. Физический процесс в игнитроне протекает в основном так же, как в тиратроне. Протекание тока в горящем игнитроне может быть приостановлено только при переходе тока через нулевое значение. Зажигание потухшего игни-



Фиг. 134. Кривая зажигания (а) и конструкция тиратрона (б).



Фиг. 135. Игнитрон:

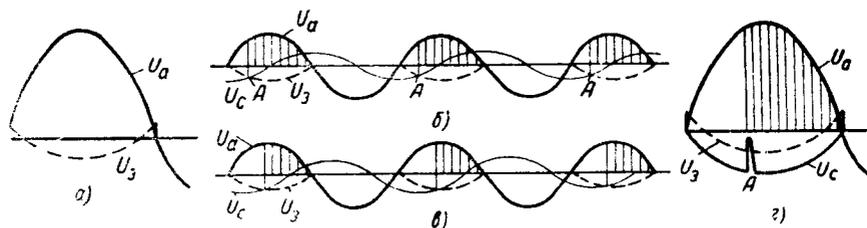
а — конструктивная схема; б — разрез стеклянно-металлического игнитрона.

трона занимает не более $0,001 \text{ сек}$. Физический процесс в игнитроне протекает в основном так же, как в тиратроне. Протекание тока в горящем игнитроне может быть приостановлено только при переходе тока через нулевое значение. Зажигание потухшего игни-

трона возможно только с помощью поджигателя, который в игнитроне выполняет функцию сетки тиратрона. На фиг. 135, б показан разрез игнитрона, рассчитанного на продолжительный ток в анодной цепи, равный $100 a$ при максимальном напряжении $1000 в$. Игнитрон состоит из металлического катодного стакана 1 с водяной рубашкой, спаянного с ним стеклянного баллона 2, анода 3, катода (ртуть) 4 и поджигателя 5. Преимущества игнитрона по сравнению с тиратроном: возможность непосредственного включения игнитрона в первичную цепь сварочного трансформатора (игнитрон легко пропускает большие анодные токи), малая чувствительность к перегрузкам и большая надежность в эксплуатации. Срок службы игнитрона — 1000 час. и более. В эксплуатации чаще всего выходит из строя карборундовый поджигатель.

§ 9. УПРАВЛЕНИЕ ЗАЖИГАНИЕМ ТИРАТРОНОВ И ИГНИТРОНОВ

Как указывалось выше, тиратрон, включенный в цепь переменного тока, при наличии соответствующего потенциала на сетке может быть зажжен в любой точке положительной полуволны анодного напряжения U_a (фиг. 136, а). На фиг. 136, а нанесена также кривая напряжения



Фиг. 136. Регулирование зажигания тиратрона.

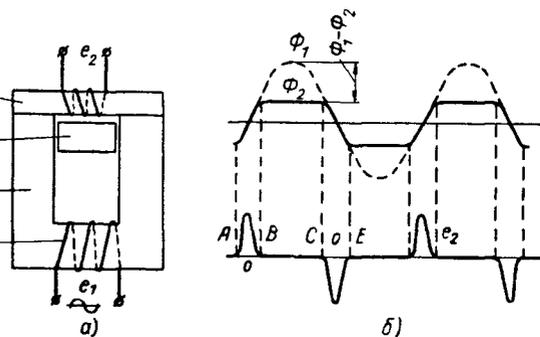
зажигания U_3 . Каждая точка этой кривой соответствует напряжению на сетке, при превышении которого тиратрон зажигается. Например, при включении сетки в цепь переменного тока U_a (фиг. 136, б) напряжение на сетке может изменяться по синусоиде U_c . В точке А потенциал на сетке превысит соответствующее напряжение U_3 , и произойдет зажигание тиратрона. Смещая по фазе напряжение на сетке по отношению к анодному напряжению, можно изменять момент зажигания тиратрона (на фиг. 136, в напряжение U_c смещено по отношению к U_c на фиг. 136, б на угол $\frac{\pi}{4}$). Такой способ управления зажиганием имеет существенный недостаток: при колебании напряжения в сети или при изменении пусковой характеристики тиратрона пересечение кривых U_c и U_3 может значительно смещаться — работа схемы мало стабильна (на практике такой способ управления не применяется). Хорошие результаты дает зажигание с помощью мгновенного пика напряжения в момент А (фиг. 136, г), создаваемого специальным пиковым трансформатором. П-образный стальной сердечник 1 пикового трансформатора (фиг. 137, а) замыкается пакетом 2, набранным из листов специального сплава (п е р м а л о я),

обладающего очень высокой начальной магнитной проницаемостью (в этом сплаве при малой напряженности магнитного поля создается значительный магнитный поток, который быстро достигает насыщения и дальше не растет). Параллельно пакету 2 располагается магнитный шунт 3. Первичная обмотка 4 питается от источника нормального синусоидального напряжения e_1 . При этом в сердечнике 1 возбуждается синусоидальный магнитный поток Φ_1 (фиг. 137, б). Этот поток свободно проходит через пермалоевый участок магнитопровода до тех пор, пока в пермалое не наступит магнитное насыщение. Дальнейший рост потока (сверх Φ_2) в пермалое невозможен. Избыточный магнитный поток ($\Phi_1 - \Phi_2$) замыкается при этом через магнитный шунт 3. Магнитный поток в пермалое изменяется по кривой Φ_2 . При нарастании магнитного потока за время AB во вторичной цепи пикового трансформатора индуктируется э. д. с. Вначале (до точки O) e_2 растет, так как на этом участке скорость изменения магнитного потока увеличивается, а затем понижается и в точке B становится равной нулю. Нулевое значение e_2 сохраняется на протяжении

всего участка BC , так как на этом участке магнитный поток не изменяется вовсе ($\Phi_2 = \text{const}$). Сечение пермалоевого участка сердечника подбирается так, чтобы он насыщался очень быстро. Полная длительность пика (интервал AB) обычно не превышает 0,001 сек. Смещая по фазе напряжение, подаваемое на первичную обмотку пикового трансформатора, можно изменять момент возникновения пика напряжения по отношению к синусоиде анодного напряжения тиратрона.

Смещение по фазе осуществляется фазорегулятором, состоящим из сопротивления 1 (фиг. 138, а), конденсатора 2 и регулируемого сопротивления 3. Если введено значительное сопротивление 3, то ток в основном протекает через конденсатор, который, как известно из электротехники, смещает переменный ток по фазе на 90° относительно напряжения. Если, наоборот, сопротивление 3 выведено почти до нулевого значения, то ток течет через это сопротивление и совпадает по фазе с напряжением сети. Изменяя величину сопротивления 3, можно плавно регулировать сдвиг фаз.

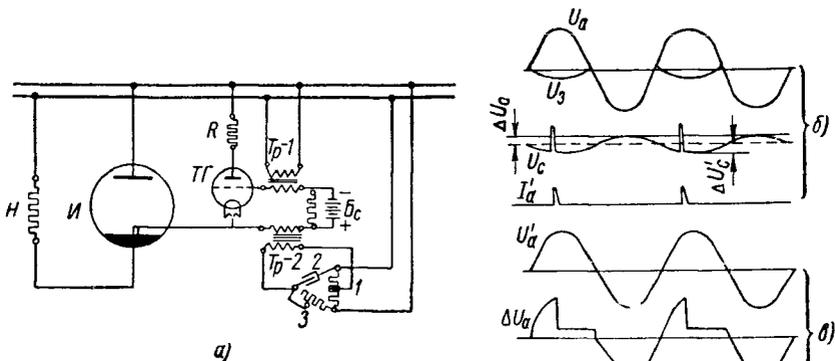
На фиг. 138, а показана принципиальная схема управления зажиганием игнитрона I с помощью вспомогательного тиратрона $ТГ$. Для этой цели поджигатель игнитрона I включается в анодную цепь тиратрона $ТГ$. Потенциал на его сетке определяется суммой электродвижущих сил трех последовательно включенных источников: батареи B_c , создающей на сетке отрицательный потенциал, надежно запирающий тиратрон;



Фиг. 137. Схема действия пикового трансформатора.

вторичной обмотки вспомогательного трансформатора $Tp-1$ и вторичной обмотки пикового трансформатора $Tp-2$. Вспомогательный трансформатор служит для того, чтобы потенциал на сетке U_c всегда имел приблизительно равное отрицательное смещение по отношению к напряжению зажигания U_z . При этом одинаковый по величине пик напряжения на сетке обеспечит надежное зажигание тиратрона в любой заданный момент времени. Пиковый трансформатор включен через описанный выше фазорегулятор, позволяющий плавно регулировать момент зажигания вспомогательного тиратрона $TГ$.

При зажигании тиратрона $TГ$ его анодный ток протекает через поджигатель, возбуждая дуговой разряд, поджигающий игнитрон. Неполно-



Фиг. 138. Управление зажиганием игнитрона.

средственно перед зажиганием игнитрона в цепи его поджигателя протекает значительный ток (до 15—30 а), который мгновенно падает почти до нуля при зажигании игнитрона. На фиг. 138, б приведены кривые изменения анодного напряжения (U_a), напряжения зажигания (U_z) и сеточного напряжения (U_c) вспомогательного тиратрона, а также его анодного тока I'_a (тока в цепи поджигателя). Сплошная прямая U_c на диаграмме соответствует потенциалу, равному нулю. Отрицательное смещение $-\Delta U_c$ создается батареей B_c ; на это постоянное отрицательное напряжение накладываются синусоидальное напряжение, создаваемое вспомогательным трансформатором $Tp-1$ ($\Delta U'_c$), и отдельные пики, создаваемые пиковым трансформатором $Tp-2$. На фиг. 138, в приведены кривые изменения анодного напряжения игнитрона U'_a (напряжения питающего его источника), падения напряжения в игнитроне ΔU_a и тока, протекающего через игнитрон, I_a . Падение напряжения в игнитроне на протяжении непроводящей части положительной полуволны анодного напряжения игнитрона, а также в течение всего отрицательного полупериода анодного напряжения равно последнему (U'_a). При горении игнитрона, как указывалось ранее, падение напряжения в нем мало (порядка 14—18 в). При анодном напряжении 220 в в игнитроне при

его горении теряется около 70% энергии. Чем выше анодное напряжение, тем относительно меньше эти потери, так как падение напряжения в игнитроне практически постоянно и не зависит от величины анодного напряжения.

Приведенные на фиг. 138, *в* кривые анодного напряжения и тока игнитрона соответствуют чисто активной нагрузке (*H* на фиг. 138, *а*). При индуктивной нагрузке ток и напряжение взаимно смещаются по фазе. Гашение игнитрона во всех случаях происходит при переходе через нуль его анодного тока (но не напряжения).

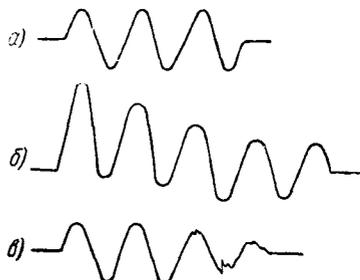
Включение двух игнитронов по двухполупериодной схеме, сходной со схемой, представленной на фиг. 132, *б*, позволяет управлять обеими полуволнами переменного тока. В сварочных машинах для управления 100—200*a* игнитронами применяются тиратроны, рассчитанные на анодный ток 15*a*.

§ 10. МЕХАНИЧЕСКИЕ, ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ И ИОННЫЕ ВКЛЮЧАТЕЛИ

Контактная сварка представляет собой, как правило, кратковременный процесс, при котором включение электрического тока многократно повторяется и должно быть синхронизировано (должно совпадать по времени) с сжатием свариваемых деталей и другими механическими операциями. Поэтому для включения контактных машин последовательно с обычным рубильником применяются специальные быстродействующие выключатели различных типов. Рубильник включается в начале рабочей смены и остается включенным до ее окончания.

Выключатели могут быть асинхронными или синхронными. Асинхронные выключатели замыкают и размыкают электрическую цепь переменного тока в произвольный момент времени. Если включение и отключение тока случайно произойдет при его нулевом значении, то осциллограмма

тока в первичной обмотке сварочного трансформатора будет иметь вид, показанный на фиг. 139, *а*. Если при повторном включении оно не совпадет по времени с моментом $I = 0$, то может иметь место значительный бросок тока (фиг. 139, *б*) — ток неустановившегося режима. Выключение тока при $I \neq 0$ приводит к возбуждению электрической дуги между разрывающимися контактами выключателя (фиг. 139, *в*), затягивающей действительный разрыв сварочной цепи. Таким образом, при асинхронном выключателе величина тока и длительность его протекания непостоянны. Асинхронные выключатели могут применяться для управления процессами контактной сварки длительностью не менее 0,15—0,2 сек. При меньшей длительности включения желательно при-

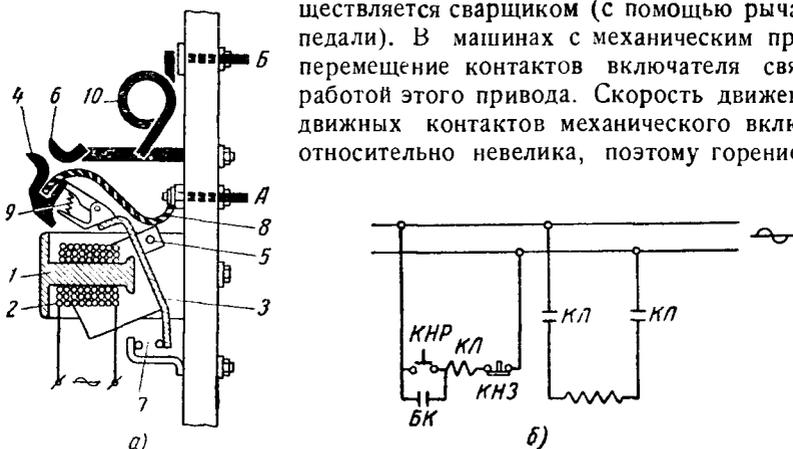


Фиг. 139. Осциллограммы первичного тока сварочного трансформатора при различных условиях включения и выключения.

менение синхронных выключателей, устроенных так, что включение тока всегда происходит в строго определенный момент времени, а выключение тока — при его нулевом значении.

Главное преимущество асинхронных выключателей — простота и относительно дешевизна. В машинах для контактной сварки применяются три типа асинхронных выключателей: механические, электромагнитные и ионные.

Механический выключатель имеет неподвижные и подвижные контакты. Перемещение последних, необходимое для замыкания и размыкания цепи сварочного трансформатора, механически связывается с движением рабочих элементов машины при зажатии и освобождении свариваемых деталей. В неавтоматических машинах это движение осуществляется сварщиком (с помощью рычага или педали). В машинах с механическим приводом перемещение контактов выключателя связано с работой этого привода. Скорость движения подвижных контактов механического выключателя относительно невелика, поэтому горение элек-



Фиг. 140. Электромагнитный контактор (а) и схема его включения (б).

трической дуги при выключении тока затягивается и контакты быстро обгорают. Это приводит к необходимости систематического наблюдения и ухода за выключателем. В высокопроизводительных машинах применение механических выключателей не рекомендуется, несмотря на их относительную дешевизну.

Электромагнитный выключатель (электромагнитный контактор) представляет собой (фиг. 140, а) электромагнит с намотанной на сердечнике 1 катушкой 2, которая взаимодействует с подвижным якорем 3, имеющим свободно устанавливающийся контакт 4. При замыкании вспомогательной (оперативной) цепи катушки 2 протекающий в ней ток создает магнитный поток, который притягивает якорь 3. Якорь, вращаясь на оси 5, замыкает контакты 4 и 6 главной цепи АБ и блок-контакты 7. Зажим А главной цепи соединен гибким проводом 8 с контактом 4. Давление в контактах регулируется пружинами 9. Зажим В соединен с контактом 6 через последовательно включенную дополнительную катушку 10, служащую для гашения дуги. Эта катушка создает сильное магнитное поле, которое в момент выключения взаимодействует с дугой, возникающей между контактами 4 и 6, и выдувает

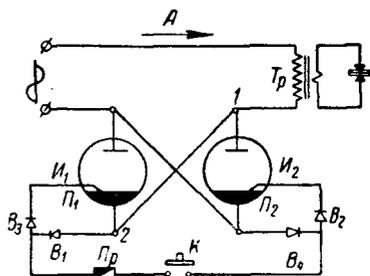
ее. Таким образом ускоряется гашение дуги. При выключении оперативного тока катушка 2 обесточивается, и якорь с контактами возвращается собственным весом подвижной системы и пружинами в исходное положение. Блок-контакты 7 являются вспомогательными контактами, служащими для включения цепей управления.

Простейшая принципиальная схема включения электромагнитного контактора показана на фиг. 140, б. Контактор *КЛ* срабатывает при включении нормально разомкнутой кнопки *КНР*. После отпускания кнопки *КНР* оперативный ток в катушке контактора протекает через блок-контакты *БК* и через контакты нормально замкнутой кнопки *КНЗ*. Контактор остается включенным до тех пор, пока нажатием кнопки *КНЗ* не разомкнется блокировочная цепь. Для включения контактных машин контакторы описанного типа одновременно разрывают цепь в двух точках. Применение таких двухполюсных контакторов облегчает гашение дуги и уменьшает износ контактов.

В настоящее время находят применение в контактных машинах синхронизированные контакторы (например, типа КС-500), которые с помощью вспомогательной обмотки и небольшого конденсатора обеспечивают выключение главного тока при $I = 0$ (включение тока происходит в произвольной точке). Эти контакторы однополюсные, так как износ их контактов незначителен вследствие отсутствия дуги в момент выключения.

В современных отечественных машинах средней и большой мощности широко применяются асинхронные ионные включатели. К ним относятся ионитронные включатели типа КИА-50 для машин мощностью 75—200 *кВа* и типа КИА-100 для машин мощностью 200—400 *кВа*. Преимущества этих включателей — отсутствие движущихся частей и контактов, бесшумная работа (при включении электромагнитного контактора наблюдается значительный удар) и отключение всегда при $I = 0$ (как указывалось выше, протекание тока в ионитроне не может быть приостановлено, пока ток не понизится до нуля).

В простейшем ионитронном включателе (фиг. 141) питание сварочного трансформатора *Тр* происходит через два ионитрона, включенных по двухполупериодной схеме. При направлении тока по стрелке *А* после нажатия кнопки *К* зажигается ионитрон *И₂*, так как при этом на аноде *И₂* создается положительный потенциал, а ток, протекающий через контакты 1 и 2, выпрямители *В₁* и *В₂*, зажигает дугу на поджигателе *П₂*. В следующий полупериод переменного тока ионитрон *И₂* гаснет, а ионитрон *И₁* зажигается. При размыкании кнопки *К* процесс прекращается (после того, как синусоида тока достигнет своего нулевого значения). В описанной схеме момент зажигания ионитронов не регулируется.



Фиг. 141. Электрическая схема двухполупериодного ионитронного включателя.

§ 11. АППАРАТУРА УПРАВЛЕНИЯ МАШИН ДЛЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

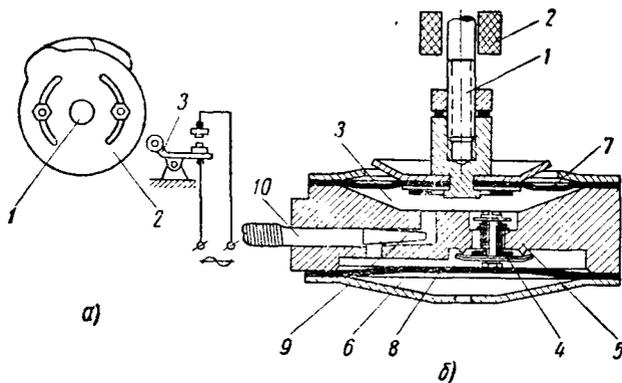
В цепях управления контактных машин широко применяются различные типы электрических реле. Реле — устройство, служащее для включения или выключения одной или нескольких управляемых электрических цепей в момент, когда в цепи управления (оперативной цепи) реле создаются определенные, заранее заданные условия. Существуют промежуточные реле (реле включается при замыкании его оперативной цепи), реле напряжения (реле срабатывает при достижении в его оперативной цепи заданного напряжения), реле тока (реле срабатывает при заданном токе в оперативной цепи), реле времени (реле срабатывает по истечении заданного отрезка времени с момента замыкания его оперативной цепи) и др. В цепях управления машин для контактной сварки наибольшее значение имеют промежуточные реле и реле времени.

Промежуточное реле принципиально не отличается от описанного в предыдущем параграфе электромагнитного контактора. Оно также состоит из магнитной системы с катушкой; якорь электромагнита связывается с тягой, на которой укрепляется от одной до шести пар подвижных, нормально (т. е. при отсутствии тока в катушке реле) открытых или нормально закрытых контактов (на принципиальных электрических схемах первые обозначаются двумя короткими параллельными линиями, а для обозначения нормально закрытых контактов две параллельные линии пересекаются третьей, наклонной). Качество работы промежуточного реле в большей степени определяется скоростью его срабатывания (временем, протекающим между включением управляющей и управляемой цепей). Время срабатывания промежуточного реле обычно близко к 0,01—0,02 сек. Маломощные быстродействующие реле могут срабатывать и значительно быстрее.

Регулирование длительности отдельных, последовательных операций при контактной сварке осуществляется регуляторами времени, для которых используются электромеханические устройства, а также электропневматические и электронные реле времени. В машинах с электрическим приводом механизма сжатия деталей обычно используется электромеханический регулятор времени, представляющий собой валик с насаженными на него кулачками. При вращении вала 1 (фиг. 142, а) выступ кулачка в течение интервала времени, регулируемого взаимным смещением шайб 2 (кулачок имеет две или три шайбы), нажимает на рычаг 3 контактной системы. При этом в зависимости от настройки контактов замыкается или размыкается цепь оперативного тока. Наличие на одном валу нескольких кулачков позволяет регулировать длительность и последовательность нескольких операций, например, сварочного нагрева и ковочного давления.

В машинах с пневматическим приводом может применяться электропневматическое реле времени (фиг. 142, б). Его шток 1 втягивается электромагнитом 2. При этом в камере 3 происходит разрежение воздуха, так как клапан 4 прижимается к своему седлу 5 пружиной и давлением воздуха в нижней камере 6 и прекращает пере-

текание воздуха через отверстие клапана (верхняя и нижняя камеры отделяются от внешней атмосферы резиновыми диафрагмами 7 и 8). Камеры регулятора, помимо отверстия, закрываемого клапаном 4, сообщаются отверстием 9, величина которого регулируется ввертыва-

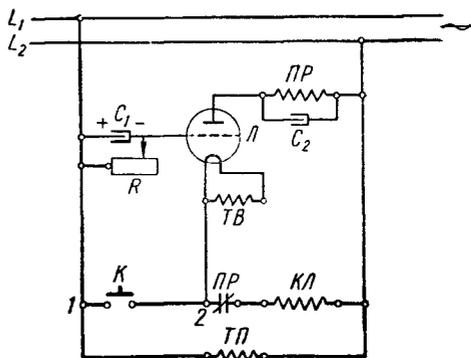


Фиг. 142. Механический (а) и пневматический (б) регуляторы времени.

нием штока 10. Чем меньше это отверстие, тем медленнее происходит выравнивание давлений в камерах и тем медленнее втягивается шток электромагнитом. Со штоком связана система подвижных контактов реле (не показанная на фиг. 142, б). Длительность срабатывания пневматического реле лежит в пределах от нескольких периодов переменного тока (50 гц) до 1,5—2 сек. При опускании штока воздух беспрепятственно проходит из верхней камеры в нижнюю через отверстие, открываемое клапаном.

В современных контактных машинах широко применяются электронные реле времени. Они позволяют надежно регулировать короткие интервалы времени, начиная от 0,01 сек. и выше. Схема одного из таких реле приведена на фиг. 143.

Реле управляет катушкой *КЛ* электромагнитного контактора, который, в свою очередь, включает не показанный на схеме сварочный трансформатор. До нажатия пусковой кнопки *К* ток от L_1 протекает через регулируемое сопротивление *R*, сетку и катод усилительной лампы *Л*, нормально закрытые контакты промежуточного реле *ПР*, катушку *КЛ* к L_2 . Этот, так называемый сеточный ток протекает только в течение того полупериода,



Фиг. 143. Принципиальная схема электронного реле времени.

когда потенциал сетки положителен по отношению к потенциалу катода. При этом падение напряжения на сопротивлении R заряжает конденсатор C_1 . Сеточный ток очень мал и недостаточен для срабатывания контактора, катушку которого он обтекает. При нажатии кнопки K включается контактор KL . Так как точки 1 и 2 при этом соединяются накоротко, протекание сеточного тока через лампу прекращается. Теперь между ее сеткой и катодом оказывается включенным конденсатор C_1 , заряженный предварительно так, что сетка имеет отрицательный потенциал по отношению к катоду. Этот потенциал запирает лампу, которая при нажатии кнопки K оказывается включенной в сеть через катушку промежуточного реле PP . Конденсатор C_1 включен через регулируемое сопротивление R , поэтому его заряд стекает постепенно с тем большей скоростью, чем меньше сопротивление. Одновременно уменьшается отрицательное смещение потенциала сетки по отношению к катоду лампы. По прошествии некоторого интервала времени, определяемого длительностью разряда конденсатора, потенциал на сетке лампы L достигает величины потенциала ее зажигания, в лампе L начинает протекать анодный ток и срабатывает промежуточное реле PP , нормально закрытые контакты которого, размыкаясь, отключают контактор KL . Если теперь отпустить кнопку K , то анодная цепь лампы L разрывается, и обесточивается реле PP . Замыкание его контактов восстанавливает исходное положение. Конденсатор C_1 опять заряжается, подготавливая схему к выполнению новой сварочной операции. Длительность разряда конденсатора пропорциональна его емкости и сопротивлению, на которое он включен. Четкость работы электронного реле времени в основном зависит от устойчивости характеристики зажигания используемой в реле лампы и от постоянства величины примененных сопротивлений. Хорошие результаты дают проволочные сопротивления, полученные намоткой тонкой проволоки с высоким удельным сопротивлением.

Конденсатор C_2 , включенный на схеме параллельно катушке промежуточного реле, предупреждает дребезжание магнитной системы этого реле, питаемого положительными полуволнами переменного тока. TP и TB — соответственно первичная и вторичная обмотки трансформатора накала катода лампы L (напряжение накала обычно 4—6 в).

Для регулирования длительности нескольких операций применяются четырех- и шестипозиционные электронные реле времени, представляющие собой компактные приборы, состоящие из четырех или шести электрически связанных между собой электронных реле времени.

ГЛАВА IX

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ МАШИН ДЛЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

§ 1. АКТИВНОЕ И ИНДУКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СВАРОЧНОЙ ЦЕПИ

Активное сопротивление сварочной цепи (сварочного контура) контактной машины складывается из сопротивлений отдельных ее элементов и из контактных сопротивлений между ними. При определении активного сопротивления необходимо учитывать нагрев (при отсутствии водяного охлаждения до $T = 80 \div 100^\circ$) и поверхностный эффект.

В сварочных цепях контактных машин встречаются постоянные и скользящие контакты. Последние применяются при подводе тока к электродам роликовых машин. Постоянные контакты, как правило, стягиваются болтами. При неокисленных контактных поверхностях и хорошем их стягивании сопротивление постоянного контакта лежит в пределах 5—10 *мком*. Сопротивление скользящего контакта обычно в 2—3 раза больше сопротивления постоянного контакта.

Индуктивное сопротивление сварочного контура зависит от его конфигурации (например, при наиболее часто встречающемся прямоугольном контуре, от отношения его сторон) и площади, а также от сечения токоведущих элементов контура. Индуктивность прямоугольной рамки со сторонами a и b равна

$$L_0 = \frac{\mu}{\pi} \left[a \ln \frac{4ab}{d(c+a)} + b \ln \frac{4ab}{d(c+b)} - 2(a+b-c) \right], \quad (71)$$

где c — диагональ прямоугольника ($c = \sqrt{a^2 + b^2}$);

d — диаметр проводника и

μ — магнитная проницаемость.

Индуктивное сопротивление

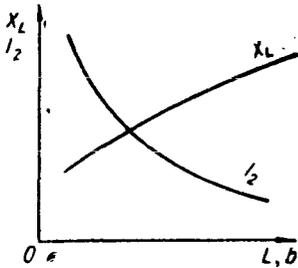
$$X_L = \omega L_0,$$

где ω — круговая частота ($\omega = 2\pi f$).

С увеличением полезного вылета машины L , а также при увеличении расстояния между плечами машины b индуктивное сопротивление сварочного контура быстро растет. Увеличение сопротивления при неизменной электродвижущей силе сварочного трансформатора приводит к уменьшению сварочного тока и мощности машины (фиг. 144).

Например, при увеличении полезного вылета с 300 до 1200 мм сварочный ток может понизиться при неизменном E_2 почти в 3 раза. Уменьшение площади сварочного контура машины — одно из наиболее эффективных средств повышения кратковременной мощности контактной машины.

Введение в контур сварочной машины магнитной стали (фиг. 145, а) ведет к повышению как активного, так и индуктивного сопротивления сварочного контура. Активное сопротивление увеличивается



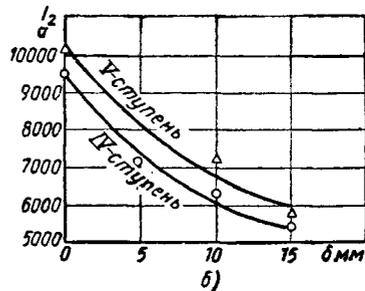
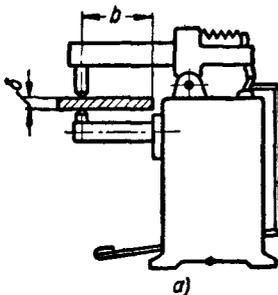
Фиг. 144. Зависимость индуктивного сопротивления сварочного контура и сварочного тока от размеров контура.

из-за появления во введенной в контур стали вихревых токов, возбуждение которых вызывает существенные потери активной мощности в сварочной цепи. Увеличение сопротивления сварочной цепи при введении магнитной стали в контур машины приводит к существенному уменьшению тока. На фиг. 145, б показана зависимость сварочного тока точечной машины АТА-40 от толщины δ введенных в контур машины стальных листов шириной $b = 300$ мм. Из диаграммы видно, что введение листов этой ширины толщиной 15 мм приводит к понижению сварочного тока почти вдвое. Поэтому следует избегать введения в контур машины деталей большого сечения

из магнитной стали и тяжелых приспособлений из магнитного материала.

Общее сопротивление сварочного контура машины равно геометрической сумме его активной и реактивной составляющих, т. е.

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_{L2}^2}. \quad (72)$$



Фиг. 145. Магнитная сталь в контуре машины (а) и зависимость сварочного тока от сечения введенных в контур стальных листов (б). (В. С. Слепак.)

Общее сопротивление сварочной машины (за исключением сопротивления ее нагрузки, т. е. сопротивления свариваемых деталей) приближенно равно

$$Z_0 = \sqrt{(R_1' + R_2 + R_{км})^2 + (X_{L1}' + X_{L2} + X_{км})^2}, \quad (73)$$

где R'_1 и R_2 — активные сопротивления первичной и вторичной обмоток сварочного трансформатора, приведенные ко вторичной цепи $\left(R'_1 = R_1 \frac{w_2^2}{w_1^2}\right)$;

$X'_{L.1}$ и $X_{L.2}$ — индуктивные сопротивления первичной и вторичной обмоток, приведенные ко вторичной обмотке $\left(X'_{L.1} = X_{L.1} \frac{w_2^2}{w_1^2}\right)$;

$R_{кт}$ и $X_{кт}$ — активное и индуктивное сопротивления сварочного контура машины.

Обозначая $R'_1 + R_2 + R_{кт} = R_{вн}$ и $X_{L.1} + X_{L.2} + X_{кт} = X_{L.вн}$, можем написать приближенную формулу для определения общего внутреннего сопротивления машины

$$Z_{вн} = \sqrt{R_{вн}^2 + X_{L.вн}^2} \quad (74)$$

Общее внутреннее сопротивление машины для контактной сварки обычно колеблется в относительно узких пределах. Для машин стационарного типа оно равно 150—350 мком. При введении в контур машины магнитной стали сопротивления $R_{кт}$ и $X_{кт}$ увеличиваются.

Расчет сопротивления сварочного контура иллюстрируется приведенным ниже примером.

Пример расчета сопротивления сварочной цепи

На фиг. 146 представлена схема вторичной цепи сварочной машины, для которой требуется определить общее сопротивление. Для расчета индуктивного сопротивления найдем по формуле (71) индуктивность прямоугольной рамки площадью 70×20 см.

При $\mu = 1,256 \cdot 10^{-8}$ гн/см

$$L_0 = \frac{1,256 \cdot 10^{-8}}{3,14} \left[70 \ln \frac{4 \cdot 70 \cdot 20}{6(72,8 + 70)} + 20 \ln \frac{4 \cdot 70 \cdot 20}{6(72,8 + 20)} - 34,4 \right] -$$

$$= 57,5 \cdot 10^{-8} \text{ гн.}$$

Индуктивное сопротивление при частоте 50 гц

$$X_L = \omega L_0 = 314 L_0 = 160 \cdot 10^{-6} \text{ ом.}$$

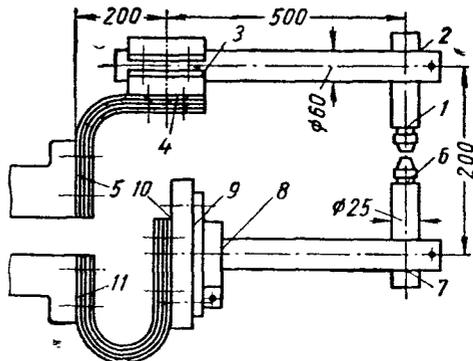
Активное сопротивление плеча равно

$$R_1 = m \rho_m \frac{l}{F} =$$

$$= 1,50 \cdot 2,25 \cdot 10^{-6} \frac{50}{28} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ ом}$$

(m — коэффициент, равный 1,5, учитывающий влияние поверхностного эффекта).

Удельное сопротивление меди принято для температуры 80° .



Фиг. 146. К расчету сопротивления сварочного контура контактной машины.

Сопротивление латунного электрододержателя по аналогии равно (при внутреннем отверстии в электрододержателе диаметром 18 мм и $m = 1,1$)

$$R_2 = m \rho_{\text{л}} \frac{l}{F} = 1,1 \cdot 8 \cdot 10^{-6} \frac{10}{2,5} = 35 \cdot 10^{-6} \text{ о.м.}$$

Влиянием поверхностного эффекта при определении сопротивления гибких шин, набранных из тонкой медной фольги, можно пренебречь. Сопротивление каждой из двух шин тогда равно

$$R_3 = 2,25 \cdot 10^{-6} \frac{30}{20} = 3,4 \cdot 10^{-6} \text{ о.м.}$$

Согласно схеме изучаемой цепи число контактов в ней равно 11 (на фиг. 146 контакты перенумерованы). Контактное сопротивление каждого из них может быть принято равным $7,5 \cdot 10^{-6}$ о.м. Суммарное активное сопротивление сварочной цепи

$$R_{\text{вн}} = 2(6 + 35 + 3,4) \cdot 10^{-6} + 11 \cdot 7,5 \cdot 10^{-6} = 170 \cdot 10^{-6} \text{ о.м.}$$

Общее сопротивление цепи (за исключением сопротивления вторичного витка сварочного трансформатора) составляет

$$Z_0 = \sqrt{160^2 + 170^2} \cdot 10^{-6} = 237 \cdot 10^{-6} \text{ о.м.}$$

Для рассчитанного участка сварочной цепи

$$\cos \varphi = \frac{170}{237} = 0,72.$$

§ 2. ВНЕШНЯЯ ХАРАКТЕРИСТИКА, $\cos \varphi$ И ПОЛЕЗНАЯ МОЩНОСТЬ МАШИНЫ

При сварке во вторичной цепи машины протекает ток

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{(R + R'_{\text{вн}})^2 + (X_L + X'_{L, \text{вн}})^2}}, \quad (75)$$

где E_2 — э. д. с. вторичной обмотки сварочного трансформатора;

R — сопротивление свариваемых деталей с учетом сопротивления шунта (если имеет место шунтирование сварочного тока) и активной составляющей сопротивления, связанной с введением в контур машины магнитной стали;

$R'_{\text{вн}}$ — активное сопротивление вторичной цепи сварочной машины, включая сопротивление вторичной обмотки трансформатора;

X_L — индуктивное сопротивление сварочной цепи, связанное с введением в контур магнитного материала;

$X'_{L, \text{вн}}$ — индуктивное сопротивление сварочного контура, включая индуктивную составляющую сопротивления вторичной обмотки трансформатора.

Полное сопротивление сварочной цепи в простейшем случае (при чисто активном сопротивлении свариваемых деталей) может быть представлено графически, как показано на фиг. 147. По оси абсцисс в некотором масштабе отложено активное сопротивление, а по оси ординат, в том же масштабе, — реактивное.

При коротком замыкании для сварочной цепи

$$\cos \varphi_k = \frac{R_{вн}}{\sqrt{R_{вн}^2 + X_{L,вн}^2}} \quad (76)$$

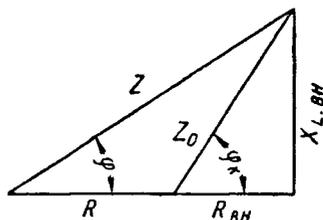
Во время сварки для этой же цепи

$$\cos \varphi = \frac{R_{вн} + R}{\sqrt{(R + R_{вн})^2 + X_{L,вн}^2}} \quad (77)$$

Как следует из фиг. 147, $\cos \varphi_k$ при коротком замыкании, т. е. при $R = 0$, всегда меньше, чем во время сварки ($\varphi_k > \varphi$).

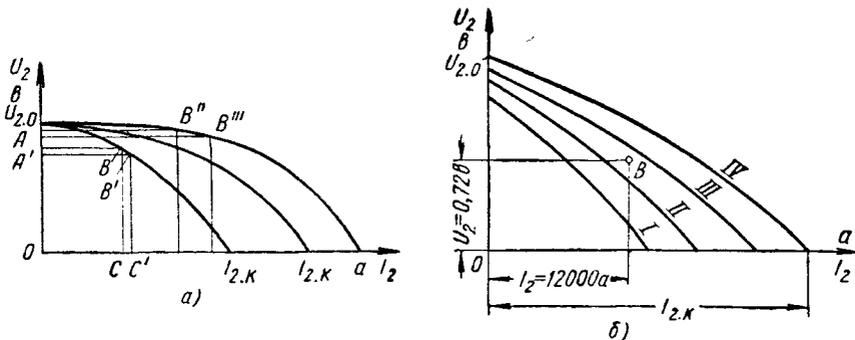
Зависимость между напряжением на электродах (или роликах) контактной машины и протекающим при этом напряжении сварочным током называется внешней характеристикой контактной машины. Внешняя характеристика (фиг. 148, а) пересекает ось абсцисс в точке $I_{2к}$, соответствующей короткому замыканию сварочной цепи (сопротивление свариваемых деталей $R = 0$ и $U_2 = 0$), и ось ординат в точке $U_2 = U_{2,0}$, соответствующей холостому ходу, т. е.

$$I_2 = 0 \text{ и } R = \infty.$$



Фиг. 147. Треугольник сопротивлений сварочной цепи контактной машины.

При одном и том же значении $U_{2,0}$ значения тока $I_{2к}$ могут отличаться: чем больше величина тока короткого замыкания $I_{2к}$, тем относительно выше внешняя характеристика.



Фиг. 148. Внешние характеристики контактных машин.

Внешняя характеристика позволяет судить о некоторых особенностях сварочной машины, с одной стороны, и, с другой стороны, дает возможность проверять пригодность машины для выполнения заданной сварочной операции.

Площадь прямоугольника $OABC$ (фиг. 148, а) представляет в некотором масштабе мощность $P_{св}$, потребляемую для непосредственного

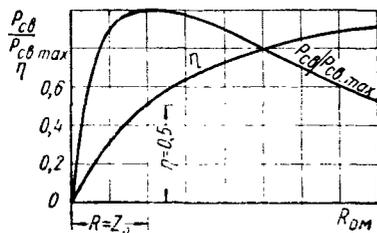
нагрева свариваемых деталей. Действительно эта площадь равна произведению $I_2 \cdot U_2$, где U_2 — падение напряжения между электродами при сварке. Если в силу каких-либо причин изменится сопротивление свариваемых деталей, следствием чего явится соответствующее изменение I_2 и U_2 , то полезная мощность $P_{св}$ определится новым прямоугольником $OA'B'C'$, площадь которого в общем случае будет отличаться от площади $OABC$. При крутопадающей внешней характеристике незначительное смещение точки B (в B') не вызовет существенного изменения площади прямоугольника (фиг. 148, *a*), т. е. при изменении условий сварки полезная мощность будет колебаться незначительно. При пологой внешней характеристике смещение точки B'' в положение B''' вызовет заметное изменение $P_{св}$. Поэтому при точечной и роликовой сварке, когда для получения устойчивого качества соединений, как правило, количество выделяемого в месте сварки тепла должно оставаться примерно постоянным, желательнее применение машин с крутопадающей характеристикой. Наоборот, при стыковой сварке оплавлением пологая внешняя характеристика целесообразнее, так как при такой форме характеристики уменьшение сопротивления перемычки жидкого металла ведет к резкому увеличению сварочного тока, что облегчает нагрев и последующее ее разрушение — процесс оплавления идет устойчивее.

Если известно сопротивление свариваемых деталей и контактов между ними и задан необходимый для сварки ток, то, пользуясь внешней характеристикой, легко определить ступень включения трансформатора, на которой должна производиться сварка. Например, при $R = 60$ мком и $I_{2кр} = 12\,000$ а напряжение $U_2 = 0,72$ в. Откладывая на диаграмме внешних характеристик, построенной предварительно для всех ступеней сварочной машины, полученные значения I_2 и U_2 , видим, что соответствующая им точка B (фиг. 148, *b*) лежит между внешними характеристиками для II и III ступеней — сварка должна производиться на III ступени включения трансформатора.

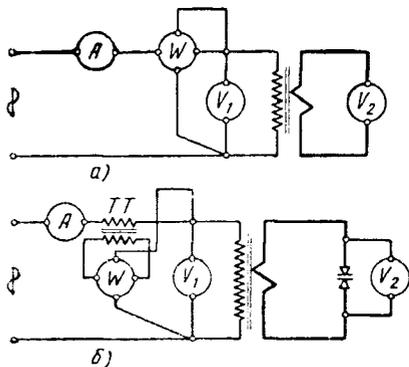
Контактные машины имеют, как правило, относительно низкий коэффициент мощности ($\cos \varphi$). Обычно при сварке на стационарных машинах $\cos \varphi = 0,4 \div 0,7$. У стыковых машин вследствие сравнительно небольшой площади сварочного контура $\cos \varphi$ имеет наибольшее значение. В точечных машинах с большим вылетом (более 1000 мм) $\cos \varphi$ иногда падает ниже 0,3. В трубосварочных машинах с вращающимся трансформатором $\cos \varphi$ вследствие очень малых размеров контура достигает 0,9.

Кратковременная кажущаяся мощность, потребляемая во время сварки, $P_{кр} = I_2 \cdot U_{2.0}$. Эта мощность тем больше, чем выше значение сварочного тока. Она достигает своего максимума при коротком замыкании ($I_{2к} \cdot U_{2.0}$), когда полезная мощность, расходуемая на нагрев свариваемых деталей, становится равной нулю. Таким образом, при коротком замыкании к. п. д. машины, т. е. отношение $\frac{P_{св}}{P_{кр}}$, становится равным нулю. На фиг. 149 приведена диаграмма, показывающая зависимость полезной мощности $P_{св}$ и к. п. д. $\eta_{св}$ от сопротивления свариваемых деталей, отложенного по оси абсцисс. Как видно из этой диаграммы,

$P_{св}$ имеет максимум, а к. п. д. сначала быстро, а затем медленно растет от 0 (при $R=0$, т. е. при коротком замыкании) до 1,0 при холостом ходе ($R=\infty$). Можно доказать, что максимальное значение $P_{св}$ соответствует $R=Z_0$, где Z_0 — полное сопротивление сварочной цепи машины без сопротивления свариваемых деталей. Из рассматриваемой диаграммы следует, что при сварке деталей, сопротивление которых близко к Z_0 , колебания в величине этого сопротивления почти не оказывают влияния на мощность $P_{св}$, и создаются условия для получения сварных соединений стабильного качества. При точечной и роликовой сварке сопротивление свариваемых деталей обычно существенно ниже сопротивления машины (в особенности при сварке деталей из цветных металлов и сплавов). При сварке



Фиг. 149. Зависимость полезной мощности и к. п. д. контактной машины от сопротивления свариваемых деталей.



Фиг. 150. К определению электрических параметров контактной машины: а — опыт холостого хода; б — опыт короткого замыкания.

оплавлением сопротивление деталей (перемычек) и машины близки по величине. Поэтому при сварке оплавлением $\eta_{св} \approx 0,5$, а при точечной (и роликовой) сварке $\eta_{св} \approx 0,2 \div 0,4$.

Основные электрические параметры машины для контактной сварки определяются двумя нормальными испытаниями: опытом холостого хода и опытом короткого замыкания.

При опыте холостого хода с помощью амперметра А, двух вольтметров V_1 и V_2 и ваттметра W (фиг. 150, а) определяются ток холостого хода, напряжение в первичной цепи трансформатора, э. д. с. его вторичной обмотки и активная мощность, потребляемая при холостом ходе. Эти измерения повторяются для каждой ступени включения сварочного трансформатора. Так как при холостом ходе потери энергии в меди первичной обмотки малы, можно считать, что измеренная активная мощность P_0 соответствует активным потерям в стали сердечника $P_{жс}$. Это предположение дает возможность определить активную составляющую тока холостого хода по формуле (57).

Опыт короткого замыкания проводится по схеме, изображенной на фиг. 150, б. При замыкании вторичного контура машины накоротко в сварочной цепи протекает очень большой ток, поэтому непосредственное включение токовой обмотки ваттметра обычно невозможно. В связи с этим прибор включается через трансформатор тока ТТ. При

коротком замыкании определяется ток короткого замыкания в первичной цепи трансформатора при его включении на каждой ступени. Ток короткого замыкания в сварочной цепи может быть найден по формуле (58). Делением соответствующей э. д. с. вторичной обмотки на ток короткого замыкания в ней легко определить полное сопротивление машины (приведенное к сварочной цепи). Значения E_2 и $I_{2к}$ для каждой ступени дают две крайние точки, необходимые для построения внешних характеристик машины. Дополнительные точки определяются следующим путем: между электродами машины зажимаются детали с большим или меньшим сопротивлением и после включения трансформатора производятся измерения всех электрических параметров по схеме фиг. 150, б. Измеренные вольтметром V_2 значения U_2 и соответствующие им величины I_2 дают возможность закончить построение внешних характеристик.

ГЛАВА X

МАШИНЫ ДЛЯ СТЫКОВОЙ СВАРКИ

§ 1. ОСНОВНЫЕ УЗЛЫ И КЛАССИФИКАЦИЯ МАШИН

На стыковой машине выполняются следующие операции: установка и закрепление свариваемых деталей, для чего служат зажимы (см. фиг. 7); перемещение свариваемых деталей при подогреве, оплавлении и осадке, для чего используется механизм привода; нагрев свариваемых деталей, для чего применяется сварочный трансформатор с включающими и регулировочными устройствами.

Все основные узлы машины устанавливаются на станине, снабженной направляющими, в которых может перемещаться подвижная плита (супорт) машины с укрепленным на ней зажимом.

Машины для стыковой сварки классифицируются:

1. По приводу механизма подачи: а) с рычажным приводом; б) с пружинным приводом; в) с пневматическим или гидравлическим приводом; г) с электроприводом; д) с комбинированным приводом (например, при подогреве плита перемещается рычагом вручную, а во время оплавления и осадки используется гидропривод).

2. По роду действия: а) неавтоматические; б) автоматические и в) полуавтоматические (подогрев ведется неавтоматически, оплавление и осадка — автоматически).

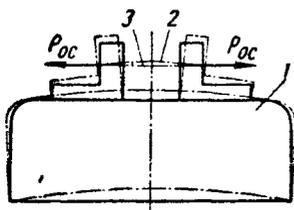
3. По назначению: а) универсальные машины и б) специализированные машины (например, машина для сварки тонких листов).

Неавтоматические машины могут быть использованы при любом варианте технологического процесса (сварка сопротивлением, сварка оплавлением без подогрева и с подогревом). Автоматические стыковые машины бывают трех основных типов: а) автоматы для сварки сопротивлением (обычно мощностью до 10 *квa*); б) автоматы для сварки непрерывным оплавлением без подогрева и в) автоматы для сварки оплавлением с подогревом, допускающие в отдельных случаях проведение сварки непрерывным оплавлением.

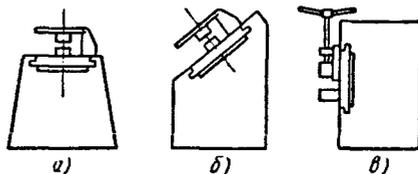
§ 2. СТАНИНЫ, НАПРАВЛЯЮЩИЕ И ПЛИТЫ МАШИН

На станине укрепляются все основные узлы стыковой машины. Усилие осадки, достигающее в мощных машинах 100 *t* и более, воспринимается станиной, которая должна обладать достаточной прочностью и жесткостью. При малой жесткости станины она изгибается при осадке (фиг. 151), нарушая соосность свариваемых деталей. Это иногда приводит также к трещинам в стыке. Быстрое охлаждение зоны стыка

немедленно по окончании сварки, но до освобождения зажимов, ведет к укорочению этой зоны; при этом расстояние между зажимами машины уменьшается и станина 1 начинает возвращаться в свое первоначальное, недеформированное положение, что вызывает изгиб сваренных деталей вблизи стыка из положения 2 в положение 3.

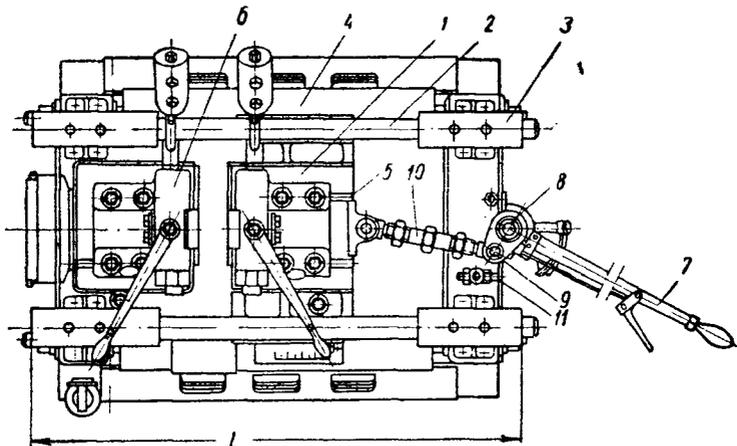


Фиг. 151. Схема деформации станины стыковой машины при осадке.



Фиг. 152. Схема стыковых машин с горизонтальным (а), наклонным (б) и вертикальным (в) столом.

Современные стыковые машины выпускаются с горизонтальным, наклонным или вертикальным столом (фиг. 152). Наклонный стол облегчает установку и освобождение свариваемых деталей и применяется в массовом производстве. Машины с вертикальным столом



Фиг. 153. Направляющие, плиты, привод подачи стыковой машины с рычажным управлением.

применяются при сварке рельсов, толстостенных труб и других тяжелых деталей. Универсальные машины малой и средней мощности (до 150—200 *кв*а) строятся с горизонтальным столом.

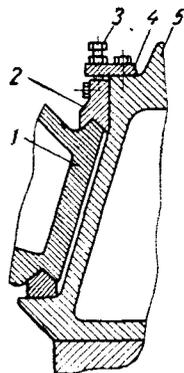
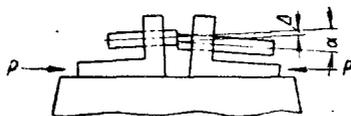
Применяются чугунные или стальные литые и сварные станины. Часть станины (стол) с направляющими для плит часто выполняется отдельно и крепится к собственной станине болтами. Это упрощает механическую обработку станины.

В стыковых машинах применяются менее совершенные короткие направляющие и направляющие с длинной базой. План стола стыковой машины с длинными направляющими, подвижной и неподвижной плитами

с установленными на них зажимами и рычажным приводом подачи показан на фиг. 153. Подвижная плита 1 крепится к длинным жестким штангам 2 прямоугольного или круглого сечения. Эти штанги вместе с подвижной плитой перемещаются приводом подачи в направляющих 3, укрепленных на столе машины 4. Большая общая длина (база) этих направляющих 1 и значительная жесткость штанг препятствуют взаимному смещению электродов левого и правого зажимов машины и уменьшают вероятность смещения и перекоса свариваемых деталей при осадке.

В плитах имеются Т-образные пазы 5 для крепления зажимов 6. Если токоведущие шины крепятся непосредственно к нижней стороне плит, то последние изготавливаются целиком из бронзы. Часто для экономии цветного металла плиты делаются из чугуна или стали, а в их средней части предусматривается вырез, в который вставляется медное или бронзовое основание электрода. Токосоводящие шины соединяются с этим основанием.

На фиг. 154, а схематически показана конструкция стола с короткими направляющими. Уже при незначительных зазорах в направляющих под действием усилий осадки плиты перекашиваются, что приводит к смещению (Δ) и перекосу (α) свариваемых деталей. Плотное затягивание направляющих с помощью регулировочных клиньев, устраняющее зазоры и перекося, ведет к заеданию и неплавному ходу при оплавлении, что технологически недопустимо. На фиг. 154, б показаны направляющие 2 подвижной плиты 1 машины с вертикальным столом. Зазор в направляющих регулируется винтом 3, передающим усилие нажатия станине 5 через планку 4.



Фиг. 154. Деформации при коротких направляющих стыковой машины (а) и разрез направляющих машины с вертикальным столом (б).

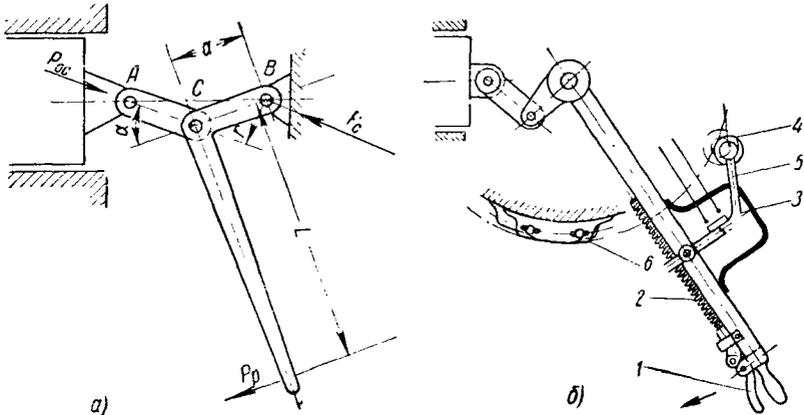
§ 3. ПРИВОД ПОДАЧИ СТЫКОВЫХ МАШИН

В современных машинах неавтоматического действия применяется рычажный привод подачи. Винтовая подача с помощью штурвала, не обеспечивающая необходимой скорости осадки и отличающаяся малой производительностью, в новых машинах не применяется. Рычажный привод по типу, показанному на фиг. 153, широко используется на машинах мощностью до 100 *кв*. Максимальное развиваемое им усилие при осадке не превышает 3—4 *т*, что делает рычажный привод неприемлемым для машин большей мощности. Коленчатый рычаг 7 поворачивается сварщиком вокруг укрепленной в станине оси 8. Короткое плечо рычага соединяется пальцем 9 и регулируемой по длине тягой 10 с подвижной плитой 1. При повороте рычага по часовой стрелке плита перемещается влево. Поворот рычага ограничивается упором 11. Расчетная схема рычажного устройства показана на фиг. 155, а. Если к концу рычага приложено усилие сварщика P_p , то из условия равенства

нулю суммы моментов всех сил относительно точки B развиваемое механизмом усилие осадки будет равно

$$P_{oc} = \frac{P_p \cdot L}{r} = - \frac{P_p \cdot L}{a \cdot \sin \alpha}. \quad (78)$$

Из этой формулы следует, что усилие осадки растет с уменьшением угла α (при $\alpha = 0$ — мертвое положение рычагов, оно теоретически достигает бесконечности). Реально достижимое усилие осадки в рычажной системе с ручным управлением не превышает 3—4 т. Ее достоинство — простота; недостатки — непостоянство развиваемого усилия



Фиг. 155. Рычажный привод стыковой машины:

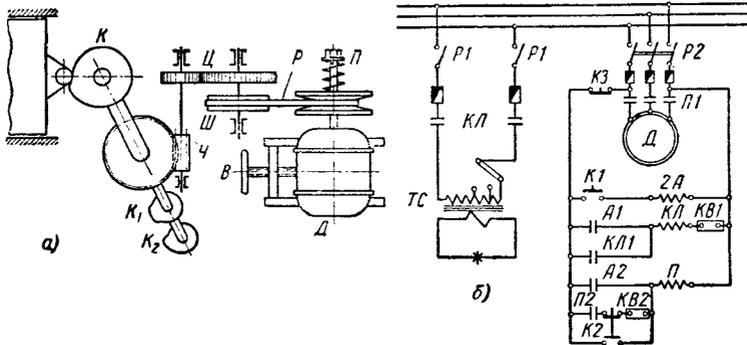
a — расчетная схема; b — механизм включения.

осадки (усилие зависит от угла α в момент окончания осадки), относительно малая скорость осадки (не более 15—20 мм/сек), утомляемость сварщика.

Рычаг используется также для управления включением и выключением сварочного тока. С этой целью на рычаге крепится специальное включающее устройство (фиг. 155, б). При нажатии на рукоятку 1 тяга 2 замыкает контакт кнопки 3, включающей через электромагнитный контактор сварочный трансформатор (иногда используется менее совершенный механический выключатель). Контакт остается замкнутым, пока рукоятка прижата к рычагу или пока ролик 4, сидящий на рычажке 5, не будет оттянут передвижным упором сегмента 6.

Сегмент устанавливается на станине машины так, чтобы выключение сварочного тока происходило автоматически при заданной величине осадки под током. Без такого устройства качественное выполнение сварки очень затруднено, так как осадка производится очень быстро и выключение сварочного тока „на глаз“ в заданный момент времени неосуществимо. Величина полной осадки определяется положением рычажной системы в момент окончания осадки и усилием, прилагаемым сварщиком к концу рычага управления.

В маломощных автоматических машинах для сварки сопротивлением применяется пружинная подача. До закрепления свариваемых деталей подвижная плита отводится в исходное положение. При этом сжимается пружина привода осадки. После установки деталей пружина освобождается пусковой защелкой. Одновременно включается сварочный ток. По мере разогрева деталей они деформируются усилием пружины. В ходе этой деформации происходит сварка. По достижении заданной величины осадки (при укорочении деталей на заданную величину) автоматически выключается сварочный ток. После этого детали освобождаются из зажимов, подвижная плита вновь отводится, и сварка



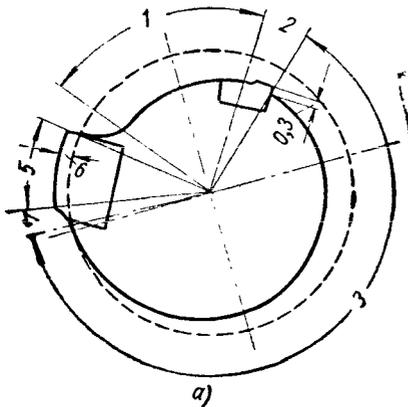
Фиг. 156. Кинематическая (а) и электрическая (б) схема автоматической стыковой машины для сварки непрерывным оплавлением.

может быть повторена. Максимальное усилие осадки, развиваемое пружинным устройством описанного типа, обычно не превышает 300 кг.

Автоматический привод подачи для сварки оплавлением наиболее прост при непрерывном оплавлении без подогрева. При этом используется электропривод, подающий подвижную плиту кулачком, профиль которого подбирается в соответствии с заданными скоростями оплавления и осадки. Принципиальная схема такого привода показана на фиг. 156, а. Вращение электродвигателя *Д* передается кулаку *К* через червячный редуктор *Ч*, пару цилиндрических шестерен *Ц* и клиноременную передачу *Р*. Изменением винтом *В* межцентрового расстояния шкива *Ш* и двигателя *Д* изменяется передаточное число, чем достигается плавное регулирование числа оборотов кулака *К*. Сидящий на валу двигателя сдвоенный конический шкив сжимается пружиной *П*. Этим обеспечивается необходимая для нормальной работы передачи сила трения между ремнем и шкивом. Один полный оборот кулака соответствует одному циклу сварки. Включение и выключение сварочного тока синхронизируются с перемещением плиты машины, т. е. с определенными углами поворота кулака *К*. Для этого на его валу имеются вспомогательные кулачки *К₁* и *К₂*, воздействующие в заданные моменты времени на установленные в машине путевые выключатели. В машинах с электрическим приводом степень осадки обычно контролируется ее

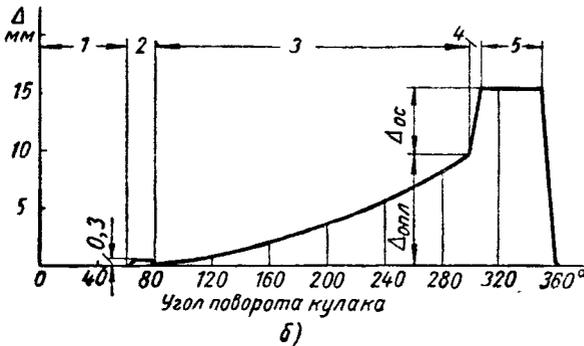
величиной: по достижении требуемого укорочения деталей при осадке автоматически отключается двигатель D .

Профиль кулака подачи подбирается так, чтобы оплавление было непрерывным, а осадка происходила с заданной скоростью. По мере разогрева свариваемых деталей скорость их оплавления растет; скорость



осадки всегда значительно выше скорости оплавления. Типовой кулак и его развертка показаны на фиг. 157. В исходном положении кулак стоит так, что ролик, связанный с плитой машины, располагается на участке 1. При этом производится установка и закрепление в зажимах машины свариваемых деталей так, чтобы их торцы соприкасались. После нажатия пусковой кнопки кулак начинает вращаться против часовой стрелки; одновременно включается сварочный ток. Вначале выступ 2 производит плотное обжатие торцов

деталей, которые вслед за этим несколько раздвигаются. Это необходимо для возбуждения оплавления, которое невозможно при плотно сжатых торцах. Далее плита машины перемещается с небольшой, но постепенно возрастающей скоростью (участок оплавления 3). На участке 4 происходит осадка на величину b , а на участке 5 — тор-



Фиг. 157. Кулак привода подачи автоматической машины для сварки непрерывным оплавлением:

a — конструкция; b — развертка.

можение системы после автоматического выключения двигателя привода. Перемещение плиты машины при сварке оплавлением требует приложения значительных усилий только при предварительном обжатии деталей и при осадке. Соответствующие им участки кулака могут быстро изнашиваться, поэтому их часто делают сменными в виде закаленных вставок.

Описанная система автоматического привода иногда объединяется с дополнительным рычажным устройством, позволяющим производить предварительный подогрев свариваемых деталей при неавтоматическом управлении процессом. В этом случае подогрев осуществляется путем повторного возвратно-поступательного движения подвижной плиты машины при включенном сварочном токе; по окончании подогрева

включается электропривод, осуществляющий автоматически оплавнение и осадку.

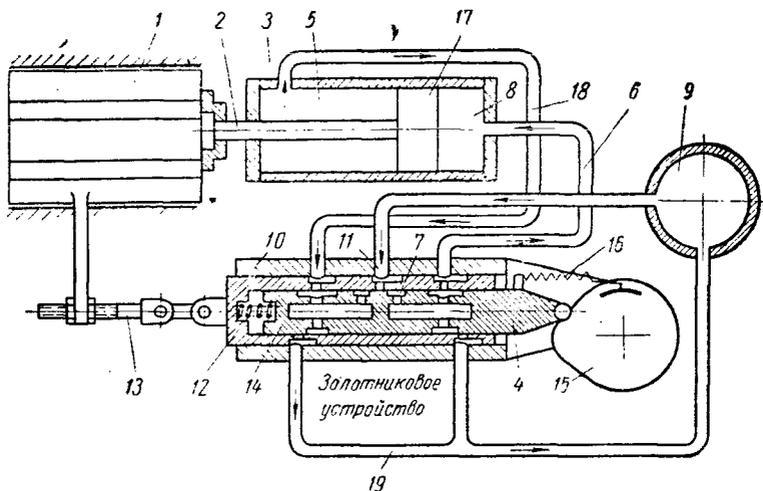
Принципиальная электрическая схема машины для сварки непрерывным оплавнением приведена на фиг. 156. б. После включения в начале рабочей смены рубильников $P1$ и $P2$ и установки в зажимах машины свариваемых деталей нажимается кнопка $K1$, включающая промежуточное реле $2A$. Его контакты $A1$ замыкают при этом цепь катушки линейного контактора KL , включающего сварочный трансформатор $ТС$ и блокирующего себя замыканием контактов $KL1$. Одновременно контакты $A2$ включают магнитный пускатель $П$ двигателя $Д$, блокирующий себя контактами $П2$. Если теперь освободить кнопку $K1$, то контактор KL и пускатель $П$ останутся включенными благодаря блокировке. Вращение двигателя $Д$ при включенном сварочном токе продолжается до тех пор, пока вспомогательный кулачок не разомкнет в заданный момент времени контакты путевого выключателя $KB1$, отключающего сварочный трансформатор контактором KL . Дальнейшее вращение двигателя приводит к размыканию вторым вспомогательным кулачком путевого выключателя $KB2$, обесточивающего катушку пускателя $П$, — двигатель останавливается, и заканчивается осадка. После освобождения сваренных деталей из зажимов система возвращается в исходное положение нажатием двояной кнопки $K2$. Этой кнопкой одновременно замыкается цепь катушки пускателя и рвется цепь его блокировки, двигатель $Д$ вращается только при нажатой кнопке $K2$. Кнопка $K3$ — аварийная. Ее нажатием обесточиваются все цепи управления машины.

При автоматической и полуавтоматической сварке применяется также гидропривод. Его преимущества по сравнению с описанным выше электроприводом — удобство регулирования, а также возможность неавтоматической сварки деталей большого сечения без существенной переделки привода; недостатки гидропривода — относительная сложность в изготовлении и эксплуатации. Схема гидропривода приведена на фиг. 158. Подвижная плита 1 соединена штоком 2 с поршнем 17 рабочего цилиндра 3 . Масло подается в цилиндр насосом 9 через золотниковое устройство 4 . Управление золотником осуществляется кулачком 15 , вращаемым приводом (не показанным на фиг. 158) с регулируемым числом оборотов (при неавтоматической работе возможно также вращение кулачка рукояткой).

Золотниковое устройство состоит из трех основных частей: корпуса 10 , укрепленного неподвижно на станине машины, золотникового цилиндра 12 , связанного тягой 13 с подвижной плитой 1 , и собственно золотника 14 , перемещающегося при вращении кулачка 15 . Золотник 14 всегда прижимается к кулачку 15 пружиной 16 .

В положении, показанном на фиг. 158, поршень 17 и связанная с ними плита 1 неподвижны, так как все отверстия золотника перекрыты и масло из насоса в рабочий цилиндр не поступает. При вращении кулачка по часовой стрелке золотник 14 начинает перемещаться влево. Как только отверстие 7 станет против трубы 11 , масло из насоса 9 поступит по трубе 6 в заднюю камеру 8 рабочего цилиндра. Одновременно масло из передней камеры 5 получит свободный выход

по трубам 18 и 19. Поршень 17 начнет двигаться влево, перемещая плиту 1. Это движение будет продолжаться до тех пор, пока золотниковый цилиндр 12, перемещающийся вместе с плитой 1, не закроет доступ масла из насоса в заднюю камеру рабочего цилиндра. При перемещении золотника 14 вправо плита также будет двигаться вправо. Таким образом, плита 1 полностью копирует движение золотника. Направление и скорость перемещения плиты машины определяются профилем кулачка 15, который строится так же, как в машинах с электрическим приводом (см. фиг. 157). Усилие осадки зависит от давления



Фиг. 158. Схема гидравлического привода стыковой машины.

масла в системе и от площади поршня 17. Усилие осадки постоянно и не зависит от величины осадки. Скорость осадки определяется пропускной способностью золотника и соединительных трубопроводов, а также профилем кулачка на участке осадки и производительностью масляного насоса. Усилие осадки в машинах с гидроприводом обычно лежит в пределах 10—100 т при давлении масла 50—70 атм.

Вращение кулачка управления может осуществляться электродвигателем небольшой мощности через соответствующую коробку скоростей и редуктор, а в случае неавтоматического управления — рукояткой. Гидропривод позволяет вручную управлять процессом при сварке деталей большого сечения.

Принципиальная электрическая схема управления гидроприводом при автоматической сварке непрерывным оплавлением не отличается от вышеописанной схемы электропривода (см. фиг. 156, б.)

Для автоматизации сварки оплавлением с подогревом широко применяется схема, изображенная на фиг. 159, в которой возвратно-поступательное движение плиты машины автоматически управляется с помощью реле напряжения, реагирующего на изменение напряжения между концами свариваемых деталей. При нажатии кнопки К1 промежуточное

Контактные системы H и B связаны между собой механически так, что при включенной системе B система H включиться не может. Осадка под током заканчивается при размыкании вспомогательным кулачком контактов $KB1$. Сварка заканчивается размыканием двух контактов $KB3$.

Автоматический переход от возвратно-поступательного движения при подогреве к непрерывному оплавлению осуществляется следующим образом. При каждом импульсе подогрева происходит кратковременное оплавление деталей. Чем выше температура деталей, тем больше скорость этого оплавления. При некоторой температуре подогрева, зависящей от скорости перемещения подвижной плиты машины и от плотности сварочного тока, скорость оплавления деталей становится равной скорости их сближения. После этого оплавление идет непрерывно, так как при оплавлении между деталями поддерживается относительно высокое напряжение, близкое к напряжению холостого хода сварочного трансформатора и достаточное для срабатывания реле $2PH$.

Описанная принципиальная схема может быть использована для автоматической сварки оплавлением с подогревом при любой системе привода (электроприводе, гидроприводе и др.).

Пневматический привод для автоматической сварки оплавлением с подогревом разработан в ЦНИИТМАШ. Скорость перемещения поршня рабочего цилиндра, привода определяется скоростью выхода масла из вспомогательного гидравлического цилиндра. При подогреве и оплавлении масло проходит относительно медленно через регулируемый дроссель. В момент осадки масло получает свободный выход из вспомогательного цилиндра и поршень воздушного цилиндра со значительной скоростью перемещает подвижную плиту машины — происходит осадка. Особенностью пневматического привода описываемой конструкции является применение автоматического контроля процесса сварки по степени нагрева деталей в зоне стыка, характеризующейся двумя параметрами осадки — ее величиной и усилием. Изучение сварки оплавлением показало, что при заданном давлении осадки качественное соединение получается, если величина осадки (укорочение деталей) лежит в определенных пределах. Если при сварке фактическая величина осадки оказывается ниже установленного нижнего предела, то это указывает на недостаточный нагрев деталей во время их подогрева и оплавления; если, наоборот, действительная осадка больше установленного ее верхнего предела, то это свидетельствует о перегреве стали. В обоих случаях качество сварки понижается. В пневматическом приводе ЦНИИТМАШ имеет контрольное устройство, которое дает сигнал о качественном выполнении сварки только в том случае, когда при заданном давлении величина осадки оказалась в заданных пределах.

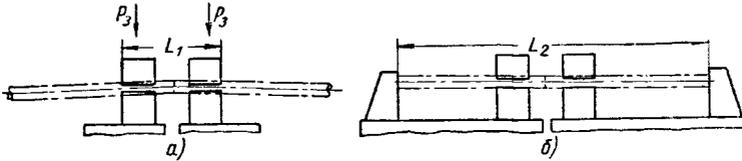
§ 4. ЗАЖИМНЫЕ И УПОРНЫЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ

Применяются две системы установки и закрепления свариваемых деталей на стыковой машине: без упоров (фиг. 160, *а*) и с упорами (фиг. 160, *б*). При сварке без упоров зажимные приспособления выполняют три функции: а) служат для правильной взаимной установки свариваемых деталей; б) передают горизонтальное усилие

осадки (при деталях с гладкой поверхностью усилие осадки передается трением между электродами зажимов и деталями, возникающим в результате действия силы зажатия P_3); в) подводят ток к свариваемым деталям.

При сварке с упорами основная часть усилия осадки передается свариваемым деталям через жесткие упоры. Последние облегчают также установку деталей благодаря увеличению установочной базы L . В этом случае усилие зажатия должно только обеспечивать надежный контакт между токоподводящими губками и деталями и может быть значительно меньше, чем при сварке без упоров.

Без упоров свариваются длинные заготовки (трубы, рельсы). В остальных случаях рекомендуется сварка с жесткими упорами, гарантирую-



Фиг. 160. Схема установки свариваемых деталей без упоров (а) и с упорами (б).

щими отсутствие недопустимого проскальзывания деталей в зажимах при осадке. При сварке без упоров для устранения проскальзывания усилие зажатия должно быть не меньше

$$P_3 \geq \frac{P_{oc}}{2f}, \quad (79)$$

где P_{oc} — усилие осадки и f — коэффициент трения между свариваемыми деталями и электродами.

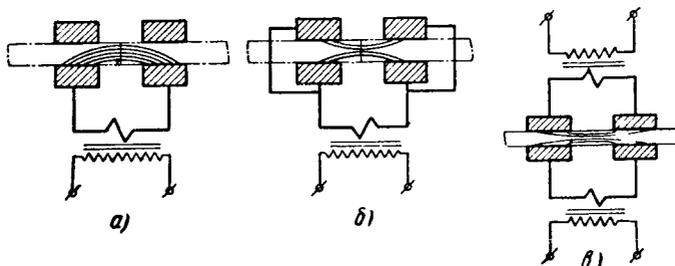
В формуле (79) учитывается трение между деталями и обоими электродами. Сила трения, воспринимаемая верхним электродом, передается корпусом зажима плите машины. В связи с этим сам корпус и его крепление к плите должны обладать соответствующей жесткостью.

Коэффициент трения f зависит как от материала свариваемых деталей, так и от материала электродов. Он уменьшается с повышением твердости деталей и электродов. При сварке горячекатанной углеродистой стали в медных электродах достаточно, чтобы $P_3 \geq 1,5P_{oc}$.

При использовании электродов из сплава высокой твердости (порядка 120—160 H_B) необходимо, чтобы $P_3 \geq 2,5P_{oc}$. При сварке нержавеющей стали усилие зажатия должно быть повышено еще на 50%, в особенности при сварке тонких листов. Применение электродов из сплавов повышенной твердости оправдывается уменьшением их износа (несмотря на увеличиваемое при этом усилие зажатия). При сварке с упорами усилие зажатия может не превышать 40—50% усилия осадки.

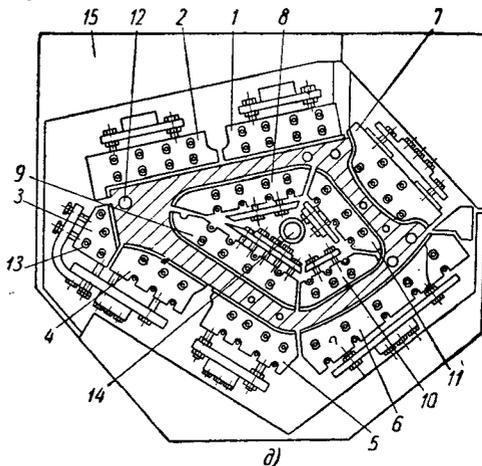
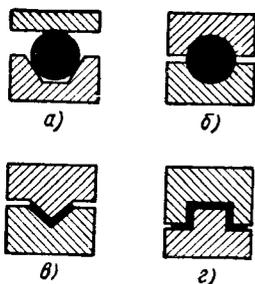
Форма электродов и конструкция зажима в целом зависят от конфигурации свариваемых деталей, поэтому в современных универсальных стыковых машинах зажимы делаются съемными и крепятся к плитам

болтами, для чего в плитах предусматриваются Г-образные пазы (см. фиг. 153). Подвод сварочного тока к деталям может быть односторонним



Фиг. 161. Подвод тока к свариваемым деталям:
a — односторонний; *б* — двухсторонний от одного трансформатора;
в — от двух трансформаторов.

или двухсторонним (фиг. 161, *б*). Первый применяется при сварке стержней и труб диаметром до 50—60 мм, а также при сварке полос и тонких листов. При этом верхний электрод иногда делается стальным. Двухсторонний подвод тока желателен при сварке



Фиг. 162. Электроды машин для стыковой сварки:

a—г — разрез электродов для сварки деталей различного сечения; *д* — электроды для сварки рамы мотоцикла. (Г. Р. Добис.)

деталей большого сечения (труб большого диаметра, рельсов), так как при этом достигается более равномерный нагрев деталей по сечению. В отдельных случаях применяется установка двух параллельно соединенных сварочных трансформаторов (фиг. 161, *в*), расположенных друг против друга. Два параллельно соединенных трансформатора применяются также при сварке листов шириной более 1000 мм. В последнем случае трансформаторы размещаются рядом и обеспечивают равномерное распределение тока вдоль свариваемых кромок большой протяженности. Особенно равномерное распределение тока по свариваемому сечению достигается в охватывающем стык кольцевом трансформаторе Института электросварки им. Патона.

На фиг. 162 приведены разрезы электродов для зажатия деталей различного сечения. Круглые детали (прутки и трубы) могут свариваться в призматических (фиг. 162, а) и цилиндрических (фиг. 162, б) электродах. Первый тип удобен при сварке мелких партий деталей изменяющегося диаметра, так как допускает сварку в одних и тех же электродах деталей разного диаметра. Второй тип лучше в массовом производстве из-за меньшего износа. Сварка тонкостенных труб без упоров может проводиться только в цилиндрических электродах, так как в призматических электродах трубы деформируются под действием значительных усилий зажатия. Для уменьшения износа электродов сварку углов и штампованных профилей желательно проводить в фасонных электродах (фиг. 162, в и г).

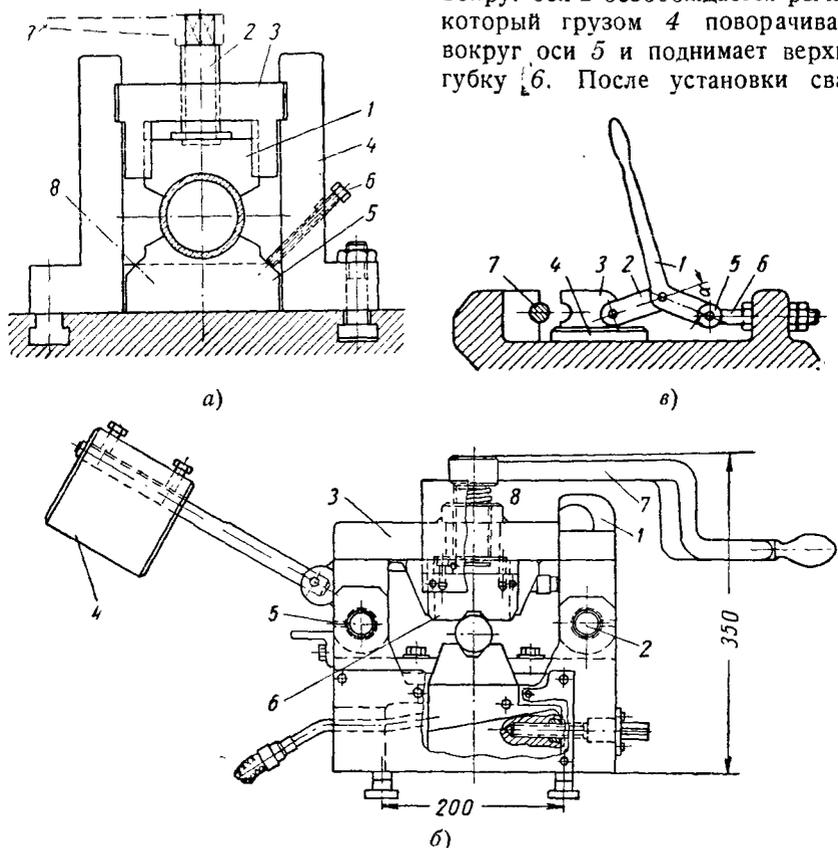
В эксплуатации при многократном зажатии свариваемых деталей контактная поверхность электродов сминается и нарушается их профиль. В результате этого затрудняется взаимное центрирование свариваемых деталей и ухудшается качество сварки. Поэтому стойкость электродов имеет очень большое практическое значение, в особенности при сварке без упоров. Стойкость электродов обеспечивается соответствующим выбором их размеров и материала. При сварке без упоров минимальная длина электрода должна быть не менее $1,5d$, где d — диаметр свариваемой детали. Кроме того, размер электрода должен быть проверен по удельному давлению на контактной поверхности, которое должно быть не более $2—3 \text{ кг/мм}^2$ при медных электродах и не более $4—5 \text{ кг/мм}^2$ при изготовлении электродов из специального сплава повышенной твердости.

Для электродов стыковых машин желательно применение бронз твердостью $140—200 H_B$ при электропроводности не ниже $40—45\%$ электропроводности меди. Этим требованиям удовлетворяют некоторые алюминиевые и кремнистоникелевые бронзы.

Для зажатия свариваемых деталей применяются различные устройства с ручным, пневматическим, гидравлическим или электрическим приводом. Тип зажима существенно влияет на производительность стыковой сварки. Он определяется величиной необходимого усилия зажатия и характером производства (индивидуальный, массовый).

На машинах малой и средней мощности обычно применяются ручные или пневматические зажимы, на машинах большой мощности — гидравлические или зажимы с электроприводом. Ручные зажимы применяются следующих систем: винтовые, рычажно-винтовые, рычажные и эксцентрикковые. Простейший винтовой зажим, применяемый при сварке трубных змеевиков, когда расстояние между смежными трубами мало и требуются минимальные размеры зажима при его надежной работе, показан на фиг. 163, а. Стальная губка 1 перемещается винтом 2, вывертываемым из гайки 3. Эта гайка может ходить в пазах корпуса зажима 4. Внизу располагается медный электрод 5, положение которого фиксируется винтами 6. Для установки свариваемой трубы гайка 3 с винтом 2 и верхней губкой 1 полностью снимаются с корпуса зажима 4, а затем вновь вводятся в пазы. При зажатии трубы винт 2 вращается съемной рукояткой 7.

Для уменьшения необходимого при зажатии деталей числа оборотов винта и для устранения необходимости полного снятия верхней части зажима с его корпуса при установке деталей применяется рычажно-винтовой зажим (фиг. 163, б). Вращением серьги 1 вокруг оси 2 освобождается рычаг 3, который грузом 4 поворачивается вокруг оси 5 и поднимает верхнюю губку 6. После установки сварив-



Фиг. 163. Ручные зажимы стыковых машин:

а — винтовой зажим системы С. А. Нарского; *б* — рычажно-винтовой зажим; *в* — однооперационный рычажный зажим.

ваемых деталей рычаг 3 снова опускается в горизонтальное положение и закрепляется серьгой 1. При этом между верхней губкой и деталью остается небольшой зазор. Поворотом рукоятки 7 вокруг вертикальной оси на 0,5—1 оборот верхняя губка прижимается винтом 8 к детали. В сочетании с упорами рычажно-винтовой зажим работает вполне надежно, обеспечивая зажатие деталей переменной толщины. Недостаток зажима — многооперационность (опускание рычага, надевание серьги, заворачивание винта), снижающая производительность труда.

На фиг. 163, б хорошо видны крепление, регулировка (винтом и клином) и охлаждение нижнего электрода.

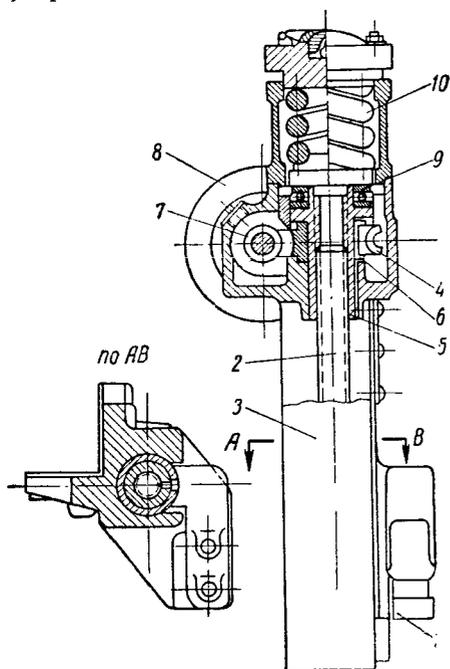
На фиг. 163, *в* показан простейший горизонтальный однооперационный рычажный зажим. При повороте рукоятки 1 рычаг 2 выпрямляется, перемещая губку 3, скользящую в направляющих 4. Положение упора 5 регулируется винтом 6. Зажатие детали 7 достигается одним движением — поворотом рукоятки. Достоинство рычажного зажима — высокая производительность; недостатки — ограниченная величина развиваемого усилия, зависимость этой величины от фактического размера зажимаемой детали (изменение этого размера на несколько десятых миллиметра может привести к резкому уменьшению зажимного усилия из-за изменения угла α в момент зажатия). Этими же недостатками страдают эксцентрикковые зажимы, в которых зажатие деталей осуществляется поворотом эксцентрика с помощью длинной рукоятки.

Механизация зажимов наиболее просто осуществляется с помощью пневматического привода. Пневматические зажимы одновременно являются и наиболее быстродействующими. Недостаток пневматического зажима (при применении сжатого воздуха нормального давления 4—6 *атм*) — необходимость его сочетания с рычажной системой, так как при ее отсутствии для получения требуемого усилия зажатия необходимо слишком большой рабочий цилиндр. Наличие рычажной системы (см. фиг. 167) делает этот зажим наиболее пригодным для сварки с упорами, когда величина усилия зажатия не оказывает решающего влияния на результаты сварки.

В гидравлическом зажиме усилие поршня обычно непосредственно передается одному из электродов. Это возможно благодаря применению высокого давления масла (от 50 до 200 *атм*). При этом усилие, развиваемое зажимом, не зависит от толщины свариваемых деталей. Недостаток гидравлического зажима — относительно низкая производительность. Эти зажимы применяются в машинах для сварки листов, в которых устройство упоров исключено, а необходимые усилия зажатия очень велики (при сварке листов из нержавеющей стали сечением 1500×4 мм необходимое усилие зажатия P_z превышает 500 *т*).

В мощных машинах для сварки рельсов и толстостенных труб применяются винтовые зажимы с электрическим приводом. Конструкция такого зажима показана на фиг. 164. Верхний электрод 1 укреплен в ползуне, перемещающемся винтом 2 в направляющих 3. Винт 2 движется поступательно при вращении червячным колесом 4 гайки 5. Усилие от колеса к гайке передается через шпонку 6, по которой гайка 5 скользит. При вращении червяка 7 электрод двигателем зажима 8 винт 2 перемещает губку вниз до упора в зажимаемую деталь. Дальнейшее вращение двигателя ведет к тому, что гайка 5, свертываясь с винта, перемещается вверх, нажимая через подпятник 9 на пружину специального динамометра 10. Усилие, сжимающее пружину, уравновешивает усилие зажатия свариваемой детали и силы трения в гайке и направляющих. При заданной степени сжатия пружины динамометра срабатывает конечный выключатель, останавливающий электродвигатель зажима. Таким образом, ограничивается усилие зажатия и предупреждается возможность перегрузки и поломки зажима.

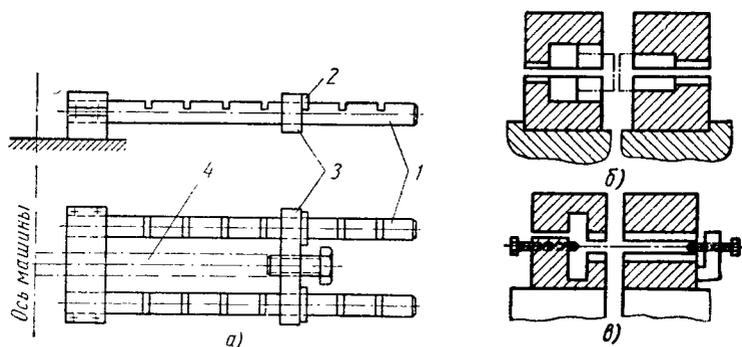
В некоторых случаях зажимные устройства для стыковой сварки превращаются в сложные специализированные приспособления. Примером



Фиг. 164. Винтовой зажим стыковой машины с электрическим приводом.

При контроле приспособления шаблон закрепляется в одном из зажимов. Очертание шаблона совпадает с очертанием свариваемой рамы. Затем

такого приспособления может служить зажим для сварки оплавляемым рамой мотоцикла, собираемой из двух штампованных половин. Зажим (см. фиг. 162, д) собирается на латунной плите 15 в вертикальной плоскости. Зажим состоит из внешних (1—7) и внутренних (8—11) секторов. Штампованная полурама (заштрихованная на фиг. 162, д) зажимается между внешними и внутренними секторами, перемещающимися в овальных отверстиях 13 с помощью пневматических устройств. Правильное положение рамы фиксируется ее втулками, входящими в отверстия 12. Труба 14 отводит газы, выделяющиеся при оплавлении. Для проверки соосности левого и правого зажимов (что совершенно необходимо для получения качественного сварного соединения при относительно малой толщине свариваемых деталей) применяется специальный шаблон.



Фиг. 165. Упорные приспособления стыковых машин:

а — упор с длинными направляющими; б — нерегулируемый упор на электродах; в — регулируемый упор на электродах.

секторы второго зажима регулируются так, чтобы имеющиеся в шаблоне штыри точно совпали с контрольными отверстиями этого зажима.

Упоры устанавливаются непосредственно на плитах машины или на специальных направляющих, применяемых при сварке с упорами относительно длинных деталей. Направляющие представляют собой круглые стальные штанги, идущие параллельно продольной оси стыковой машины. Направляющие укрепляются в специальном кронштейне, устанавливаемом на плите. Штанги 1 (фиг. 165, а) имеют по длине ряд поперечных вырезов. При подъеме упорных планок 2 траверса 3 может свободно перемещаться вдоль направляющих штанг. При опущенных планках траверса служит упором свариваемой детали 4. В центре траверсы имеется упорный винт, ось которого точно совпадает с продольной осью свариваемых деталей. При несовпадении этих осей появляется момент, изгибающий штанги. При длинных направляющих упора их свободный конец может поддерживаться кронштейном или отдельной стойкой.

Иногда конструкция упорных приспособлений предусматривает регулирование положения упорного винта в вертикальном и поперечном (по отношению к продольной оси свариваемых деталей) направлениях. Это усложняет упоры, но дает возможность более точно устанавливать свариваемые детали. При сварке коротких деталей упоры могут объединяться с зажимными приспособлениями. Нерегулируемый и регулируемый упоры этого типа показаны на фиг. 165, б и в.

§ 5. ХАРАКТЕРИСТИКА СЕРИЙНЫХ МАШИН И ИХ ВЫБОР

Все машины серийного выпуска могут быть отнесены к одной из четырех основных групп: а) автоматические машины малой мощности для сварки сопротивлением; б) неавтоматические машины малой и средней мощности с рычажным управлением; в) автоматические машины для сварки непрерывным оплавлением, иногда допускающие полуавтоматическую работу при сварке с подогревом; г) машины большой мощности для автоматической сварки с подогревом.

Основные характеристики типовых стыковых машин серийного выпуска приведены в табл. 18. Указанные в этой таблице наибольшие сечения деталей соответствуют сварке малоуглеродистой стали (кроме машины РСМ-320У, для которой это сечение соответствует сварке среднеуглеродистой рельсовой стали). Ограничение сечения при непрерывной работе определяется нагревом машины и ее продолжительной мощностью. Максимальное сечение свариваемых деталей при работе с перерывами определяется номинальной (кратковременной) мощностью. Площадь сечения свариваемых деталей иногда ограничивается не электрической мощностью машины, а величиной ее максимального усилия осадки. Это особенно часто наблюдается при сварке легированных, трудно деформируемых сталей. Например, на машине типа МСМ-150 при полуавтоматической работе возможна сварка деталей из малоуглеродистой стали сечением до 2400 мм². Мощность машины вполне достаточна для подогрева и оплавления деталей этого сечения и из аустенитной стали. Однако при максимальном усилии осадки, равном 6500 кг, и удельном давлении 2,7 кг/мм² получить сколько-нибудь удовлетворительную сварку деталей из аустенитной стали невозможно (максимальное

Характеристика серийных машин

Показатели	Единица измерения	Тип		
		АСИФ-5	АСИФ 25-У	АСИФ-50-У
Первичное напряжение	<i>в</i>	220, 380	220, 380	220, 380
Номинальная мощность	<i>кВа</i>	5	25	50
Номинальная продолжительность включения (ПВ)	<i>%</i>	25	25	25
Номинальный ток в первичной цепи	<i>а</i>	23, 13	113, 66	226, 132
Наибольшее свариваемое сечение при непрерывной работе (малоуглеродистая сталь)	<i>мм²</i>	60	120 или 200 ¹	400
Предельное число сварок в час ²	шт.	100	30—50	30—50
Наибольшее свариваемое сечение при работе с перерывами	<i>мм²</i>	100	400	800
Число ступеней регулирования трансформатора	шт.	4	6	6
Пределы регулирования вторичного напряжения	<i>в</i>	1,16—1,74	2,0—3,5	2,9—5,0
Ориентировочный наибольший ток в сварочной цепи при подогреве и осадке	<i>а</i>	3500	9000	12 000
Характер действия машины	—	Автоматический	Автоматический и неавтоматический	Неавтоматический
Привод подачи	—	Пружинный	Пружинный или рычажный	Ручной рычажный
Максимальный ход подачи	<i>мм</i>	14	15 или 20	25
Наибольшее расстояние между плитами	"	14	50	50
Максимальное усилие осадки	<i>кг</i>	150	300 или ~ 1000	~ 2500
Тип зажимов	—	Эксцентриковый	Эксцентриковый	Рыча
Усилие зажатия	<i>кг</i>	300	~ 2000	~ 3000
Вес машины	"	107	300	325
Габариты: высота	<i>мм</i>	690	1150	1100
ширина	"	616	1450	600
глубина	"	436	950	1500

¹ Первая цифра соответствует автоматической сварке сопротивлением

² При непрерывной работе.

³ При автоматической сварке деталей сечением 750 мм².

⁴ При автоматической сварке деталей сечением 1000 мм².

Таблица 18

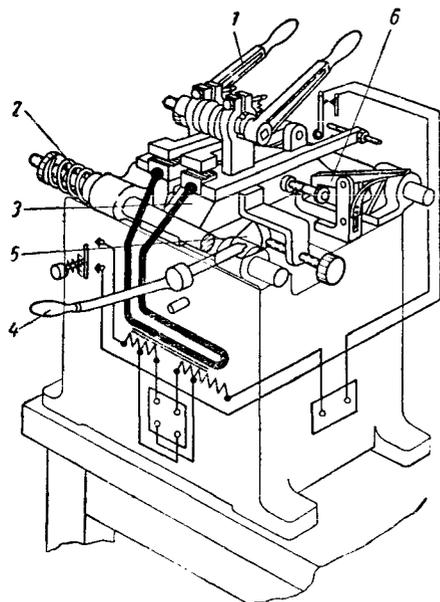
для стыковой сварки

машины				
АСИФ-75-У	МСР-100	МСМ-150	МСГ-200	РСКМ-320У
220, 380 75	380 100	380 150	380 200	380 320
25	20	20	20	25
339, 198	263	395	526	840
800	1000	750	1500	6000
30—50	25—50	110 ³	50 ⁴	5—15
1500	2500	2400	3600	10 000
8	8	8	8	16
3,5—7,0	4,5—7,6	4,53—7,75	4,75—8,49	4,7—10,5
15 000	16 000	23 000	28 000	35 000
Неавтоматический	Неавтоматический	Автоматический (с неавтоматическим подогревом)	Автоматический (с неавтоматическим подогревом)	Автоматический (с автоматическим подогревом)
Ручной рычажный	Ручной рычажный	Электрический	Гидравлический	Электрический
30	36	25	40	50
80	82	100	110	175
~ 3000	~ 3000	6500	12 000	25 000
ж н о - в и н т о в о й		Пневматический	Гидравлический	Винтовой с электроприводом
~ 2000	~ 2000	2500	6030	35 000
410	1310	2000	4000	13 000
1100	1440	1440	1600	2 910
600	2846	2430	3800	3 040
1500	1865	1200	1300	1 890

с использованием пружинного привода подачи.

сечение деталей из аустенитной стали, которые могут быть удовлетворительно сварены с подогревом на машине МСМ-150, не превышает 500 мм^2 , что соответствует удельному давлению осадки 13 кг/мм^2 .

К первой группе относится машина АСИФ-5 (аппарат стыковой И. Филановича мощностью 5 ква), предназначенная для сварки проволоки. Машина устанавливается на специальной подставке или крепится



Фиг. 166. Автоматическая стыковая машина с пружинной подачей типа АСИФ-5.

на верстаке. Машина снабжена эксцентриковыми зажимами 1 (фиг. 166). Осадка осуществляется пружинами 2. Подвижная плита 3 отводится вправо с помощью рукоятки 4, вращающей вокруг горизонтальной оси эксцентрик 5. Защелка 6 удерживает подвижную плиту в крайнем правом положении. После установки и зажатия свариваемых деталей нажимается защелка 6, и начинается сварочный процесс.

К первой же группе относятся машины АСП-3 и АСП-10.

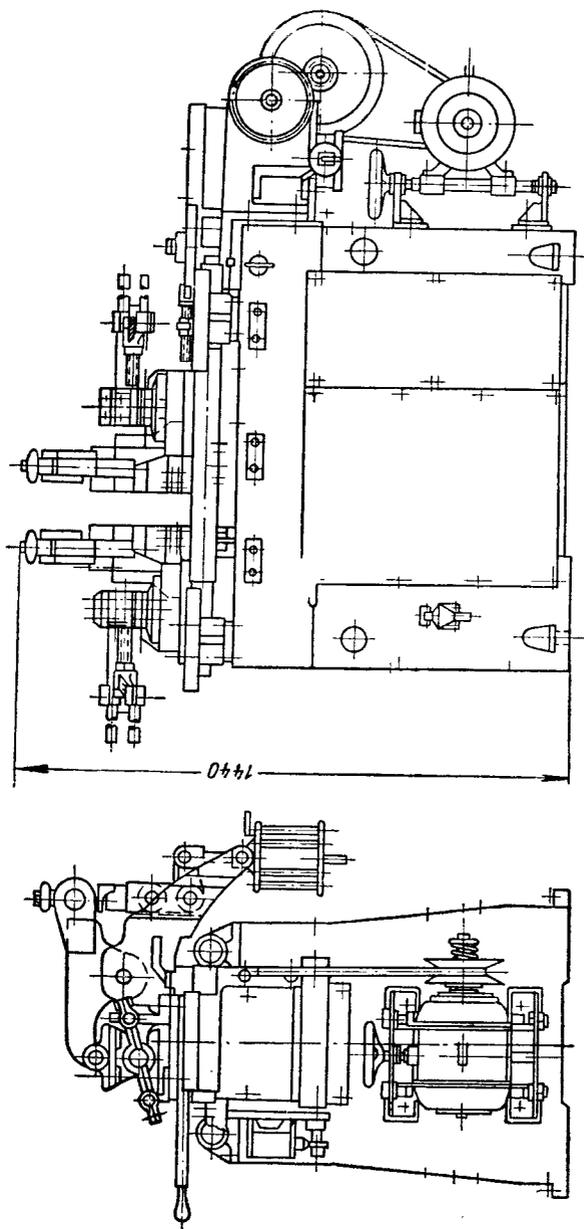
Ко второй группе относится машина АСИФ-50 (см. фиг. 7).

Машина снабжена рычажно-винтовыми зажимами, рычажным приводом подачи, направляющими с длинной базой, механическим включателем тока. К этой же группе относятся машины АСИФ-25 (имеющая дополнительный пружинный привод для автоматической

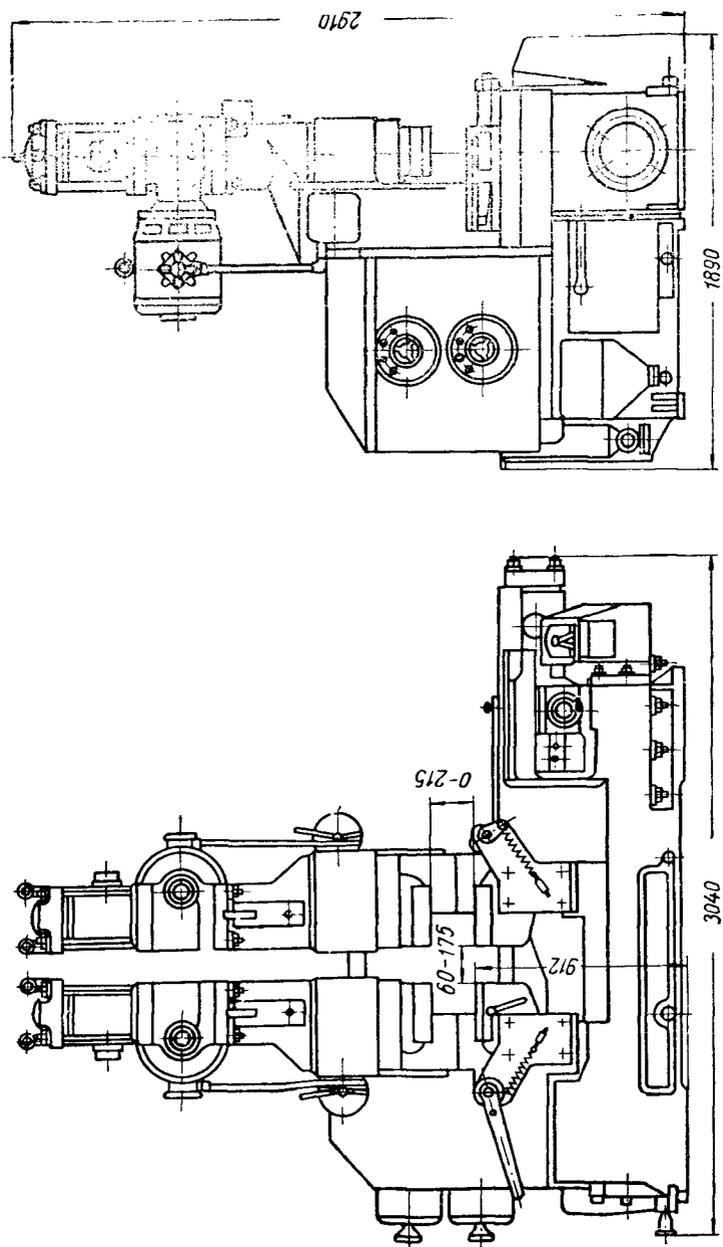
сварки сопротивлением), АСИФ-75 (отличающаяся от машины АСИФ-50 только использованием более мощного трансформатора), МСР-100 (машина стыковая рычажная мощностью 100 ква , снабженная электромагнитным контактором взамен механического включателя), а также серия машин довоенного выпуска (АСА-30, АСА-60 и АСА-100), часто встречающихся на машиностроительных заводах.

К третьей группе относятся машины с электрическим или гидравлическим приводом мощностью $150—300 \text{ ква}$. Общий вид машины МСМ-150 с электроприводом показан на фиг. 167. Машина снабжена съемными пневматическими зажимами, упорными приспособлениями ранее описанной конструкции, электрическим приводом с регулируемым числом оборотов кулака. Машины с гидравлическим приводом строятся мощностью 200 ква (машина МСГ-200) и выше и могут работать по автоматической или полуавтоматической схеме.

К четвертой группе относится машина РСКМ-320У, а также машины более раннего выпуска типа РСКМ-200 и РСКМ-201. Машина имеет электропривод подачи и зажимов (фиг. 168, см. также фотографию машины



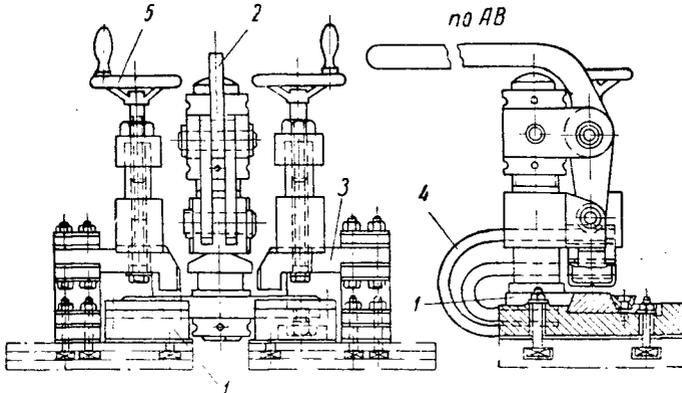
Фиг. 167. Автоматическая стыковая машина типа МСМ-150 для сварки непрерывным оплавлением.



Фиг. 16. Автоматическая стыковая машина типа РСКМ-320У для сварки оплавлением с подогревом.

на фиг. 4). Привод подачи осуществляется двумя двигателями с различным числом оборотов: тихоходным при подогреве и оплавлении и быстроходным при осадке. Величина усилия осадки ограничивается динамометром, работа которого сходна с работой динамометра зажимных устройств (см. фиг. 164). Таким образом, в этих машинах осадка контролируется по усилию, а не по величине деформации.

Подбор стыковой машины для выполнения той или иной сварочной операции производится на основе технических характеристик стыковых машин (см. табл. 18) по следующим исходным данным: площади и



Фиг. 169. Приспособление к стыковой машине для сварки по методу Игнатъева.

форме поперечного сечения свариваемых деталей, их длине, марке стали, серийности производства и требуемой производительности. Характер производства, требуемая производительность и сечение свариваемых деталей определяют оптимальные условия сварки (сварка непрерывным оплавлением, сварка с подогревом; автоматический, полуавтоматический или неавтоматический процесс) и, как следствие, необходимую мощность машины (см. табл. 6).

Характер процесса, марка стали и сечение свариваемых деталей определяют второй основной параметр, по которому производится выбор стыковой машины, — усилие осадки. После подбора машины по мощности и усилию осадки необходимо убедиться в том, что рабочее пространство машины достаточно для размещения в нем деталей заданных размеров и формы. Наконец, при невозможности сварки с упорами (при сварке длинных или нежестких деталей) необходимо проверить, достаточно ли развиваемое зажимами усилие для того, чтобы при осадке не было проскальзывания свариваемых деталей. В отдельных случаях приходится заменять слабые зажимы более мощными. Благодаря удобному креплению зажимов в серийных машинах такая замена не вызывает особенно больших затруднений. При сварке с упорами усилие, развиваемое зажимами, обычно не ограничивает технических возможностей стыковой машины.

Помимо универсальных стыковых машин серийного выпуска, в промышленности применяются различные специализированные машины. К ним относятся машины для сварки лент и листов (например, машины ЦНИИТМАШ для сварки листов шириной до 1500 мм), машины для сварки звеньев цепей, машины для одновременной сварки нескольких стыков (например, машина для сварки четырех углов рамки окна автомобиля).

Нормальные стыковые машины могут быть также использованы для прессовой сварки по методу Игнатъева. Для этого обычные зажимы заменяются специальными приспособлениями (фиг. 169). Свариваемые детали укладываются на плиту 1 и прижимаются к ней рычажным прессом 2. Электроды 3 соединяются гибкими шинами 4 с неподвижными в данном случае плитами машины. Прижатие электродов производится винтами 5.

ГЛАВА XI

МАШИНЫ ДЛЯ ТОЧЕЧНОЙ И РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКИ

§ 1. ОСНОВНЫЕ УЗЛЫ И КЛАССИФИКАЦИЯ МАШИН

Машины для точечной и рельефной сварки (сварочные прессы) не имеют принципиальных отличий. Точечная машина достаточной мощности может быть использована для рельефной сварки и, наоборот, сварочные прессы иногда применяются для точечной сварки деталей большой толщины. На точечных машинах (и сварочных прессах) выполняются две основные операции: сжатие свариваемых деталей, для чего используется механизм сжатия, и нагрев свариваемых деталей, для чего служат сварочный трансформатор, соединяемый с рабочими частями машины с помощью гибких шин (см. фиг. 10), и соответствующая пусковая и регулировочная аппаратура.

Машины для точечной сварки классифицируются:

1. По числу свариваемых точек: а) *одноточечные*; б) *двухточечные*; в) *многоточечные*.

2. По приводу механизма сжатия: а) *с педальным приводом*; б) *с электрическим приводом*; в) *с пневматическим приводом*; г) *с гидравлическим приводом*; д) *с комбинированным приводом (например, пневмогидравлическим)*.

3. По роду действия: а) *неавтоматические*; б) *автоматические*.

4. По способу установки: а) *стационарные*; б) *передвижные или переносные (подвесные)*.

5. По направлению перемещения подвижного электрода машины (обычно верхнего): а) *с вертикальным ходом* (электрод имеет поступательное движение); б) *с ходом по дуге окружности*.

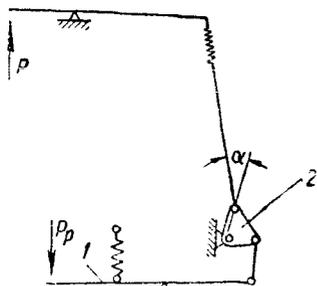
§ 2. МЕХАНИЗМЫ СЖАТИЯ И ВКЛЮЧЕНИЯ

В точечных машинах механизм сжатия электродов обычно используется и для включения сварочного тока (непосредственно при механических включателях, или через вспомогательные элементы — при электромагнитных контакторах и ионных включателях).

В простейшей машине для одноточечной сварки нижний электрод — неподвижный, а верхний перемещается, сжимая свариваемые детали. Для перемещения свариваемых деталей в машине расстояние между разжатыми электродами должно быть не меньше 15—40 мм. Этим размером определяется величина рабочего хода верхнего электрода. В некоторых машинах возможен также установочный ход верхнего электрода на 100—200 мм, облегчающий установку в машине узлов большого размера.

Принципиальная схема механизма сжатия и включения определяется сварочным циклом. Простейший цикл (см. фиг. 81, а) характеризуется постоянством усилия сжатия электродов во время сварки и применением одного импульса сварочного тока.

Точечные машины серийного выпуска мощностью до 25 *кв*а (в отдельных случаях до 75 *кв*а) строятся с педальным приводом механизма сжатия. При этом обычно используются механические выключатели. Электрокинематическая схема такой машины (типа АТП-25) показана на фиг. 10. Это — стационарная одноточечная машина неавтоматического действия с перемещением верхнего электрода по дуге окружности. При нажатии на педаль 12 тяга 10 вращает сектор 14 вокруг оси 15. При этом сначала рычаг 8 поворачивается вокруг оси 16 и сближает электроды до их соприкосновения со свариваемыми деталями, а затем сжимается пружина 11, создающая на электродах необходимое усилие. При заданной степени сжатия пружины 11 собачка 17 нажимает на рычажок 18 механического выключателя 22.



Фиг. 170. Кинематическая схема педального механизма сжатия точечной машины.

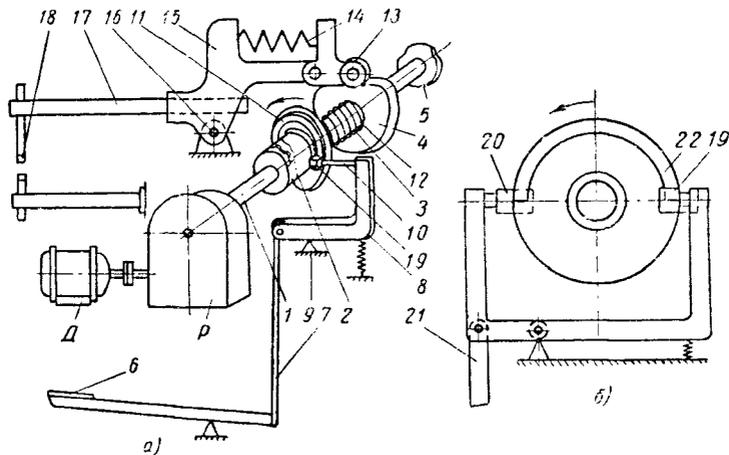
Для окончания сварки педаль нажимается сварщиком до отказа (при этом усилие сжатия электродов несколько увеличивается), собачка 17 проскакивает за рычажок 18 и пружина 19 быстро выключает сварочный ток. При освобождении педали вся система пружиной 20 возвращается в исходное положение, причем собачка 17, вращаясь вокруг оси 21, свободно проходит мимо рычажка 18.

Принципиальная схема описанного механизма сжатия приведена на фиг. 170. К концу педали 1 прикладывается усилие сварщика P_p (при длительной работе P_p не превышает 15—20 кг). При вращении сектора 2 уменьшается угол α , и на электродах появляется усилие P . Чем меньше угол α в момент окончания сжатия деталей, тем ближе система к мертвому положению и тем выше развиваемое усилие P . Практически описываемый механизм может развивать усилие до 250—400 кг. Существенный недостаток педального привода точечных машин — непостоянство сжимающего усилия из-за зависимости этого усилия от положения системы, определяемого углом α в конце сжатия. При смене электродов или их износе положение рычагов и угол α могут изменяться.

Длительность сварочного нагрева (длительность сварки) на педальных машинах обычно определяется сварщиком на глаз по степени нагрева свариваемых деталей. Однако при наличии электромагнитного контактора и электронного реле времени выключение тока может быть относительно просто автоматизировано. Непостоянство усилия сжатия и переменная длительность включения (при неавтоматической работе машины) приводят к неоднородному качеству сварных точек.

В массовом производстве широко применяются точечные машины с электрическим приводом механизма сжатия. Кинематическая схема такого

привода для машины с перемещением верхнего электрода по дуге окружности приведена на фиг. 171, а. Двигатель *Д* через червячный редуктор *Р* вращает вал *1*, сцепляющийся зубчатой муфтой *2* с кулачковым валом *3*, на котором сидят кулачок давления *4* и вспомогательный кулачок включения тока *5*. Кулачок *5* воздействует на не показанный на схеме включатель, замыкающий в нужный момент контакты в цепи катушки электромагнитного контактора, включающего сварочный трансформатор. При нажатии на педаль *6* тяга *7* поворачивает рычаг *8* вокруг шарнира *9*. При этом палец *10* с сидящим на его конце роликом *11*



Фиг. 171. Кинематическая схема электрического привода механизма сжатия точечной машины:

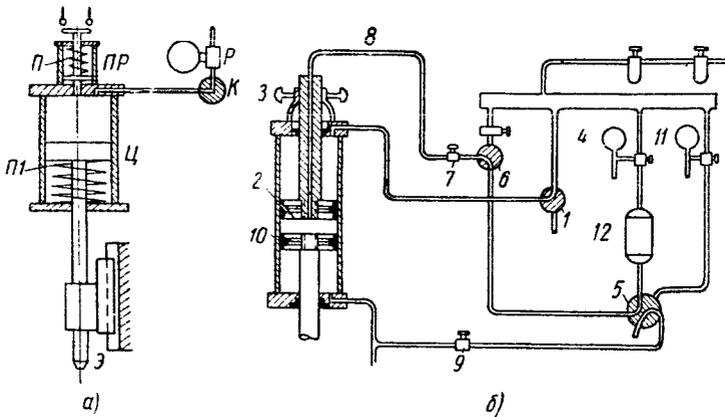
а — для автоматической и *б* — для неавтоматической работы.

ком *19* сходит с выступа на упорной шайбе *11*, пружина *12* включает муфту *2*, и начинает вращаться вал *3* с кулачками *4* и *5* (двигатель *Д* включается предварительно и вращается непрерывно в течение всей рабочей смены). Кулачок *4* через ролик *13* и пружину *14* поворачивает коромысло *15* вокруг оси *16*, опуская верхнее плечо *17* с электродом *18*. Одновременно вспомогательный кулачок *5* включает оперативную цепь контактора. Длительность протекания сварочного тока определяется положением раздвижных шайб кулачка включения (см. фиг. 142, *а*).

Кулачки давления и включения тока рассчитываются так, что при вращении кулачкового вала *3* сначала выключается сварочный ток, а затем снимается давление с электродов, этим предупреждается возможность обгорания электродов. Если после нажатия педали быстро ее опустить, то кулачковый вал сделает только один оборот, так как при вращении упорной шайбы *11* ее выступ, набегая на ролик *19* пальца *10*, отведет правую полумуфту, сжимая пружину *12*, и выведет ее из зацепления, кулачковый вал после одного полного оборота остановится, и цикл сварки будет завершен. Для сварки следующей точки необходимо вторично нажать педаль *6*. Если педаль остается нажатой непрерывно, то муфта *2* все время находится в зацеплении и цикл сварки

повторяется многократно с ритмом, соответствующим числу оборотов кулачкового вала (обычно от 30 до 70 в минуту).

Несколько усложненная конструкция качающегося рычага (фиг. 171, б) позволяет использовать описанный привод также для неавтоматического управления процессом. В этом случае взамен одного ролика 19 (фиг. 171, а) применяются два ролика—19 и 20 (фиг. 171, б). При нажатии на педаль штанга 21 перемещается вверх, и ролики 19 и 20 переходя в положение, показанное пунктиром. Ролик 19 сходит с выступа 22, и кулачковый вал начинает вращаться против часовой стрелки.



Фиг. 172. Схемы пневматического привода точечных машин.

При нажатой педали вал повернется только на 180° , так как ролик 19, находящийся при этом в положении, показанном пунктиром, при повороте на полоборота вновь отодвинет упорную шайбу и выведет из зацепления зубчатую муфту. При таком положении кулачкового вала на электродах действует полное усилие сжатия и включен сварочный ток. Это будет продолжаться до тех пор, пока сварщик не освободит педаль, возвращая ролики 19 и 20 в их исходное положение. После этого вал сможет повернуться еще на 180° (в исходное положение), сварочный ток выключится, и усилие с электродов будет снято. Для перехода к автоматической работе достаточно снять ролик 20, после чего машина будет работать по схеме, изображенной на фиг. 171, а.

Преимущества электропривода механизма сжатия — простота и надежность в эксплуатации; его недостатки — постоянная длительность сварочного цикла (иногда тормозящая рост производительности труда) и трудность поддержания постоянства усилия сжатия (в частности, оно изменяется при изменении длины электродов и при колебаниях в толщине свариваемых деталей). Эти недостатки в значительной степени устраняются при использовании пневматического привода, получившего очень большое распространение в современных точечных машинах средней и большой мощности.

В простейшем пневматическом приводе точечной машины (фиг. 172, а) воздух из магистрали с давлением 4—6 *ати* поступает в верхнюю

камеру рабочего цилиндра *Ц* через воздушный редуктор *Р* и трехходовой кран *К*. При этом поршень со штоком перемещаются вниз вместе с укрепленным на конце штока электрододержателем и электродом Э, имеющим в этом случае вертикальный ход. При зажатии свариваемых деталей между электродами движение поршня прекращается, и давление воздуха в цилиндре быстро достигает установленного с помощью редуктора значения. При этом давление на шток пневматического реле *ПР* становится больше усилия предварительного сжатия регулируемой пружины *П*; шток включателя поднимается, замыкая контакты оперативной цепи катушки главного контактора, и включается сварочный ток. Длительность его включения определяется с помощью электронного, пневматического или иного реле времени. По окончании сварки верхняя камера цилиндра краном *К* сообщается с атмосферой, и пружина *П* поднимает поршень, освобождая сваренные детали.

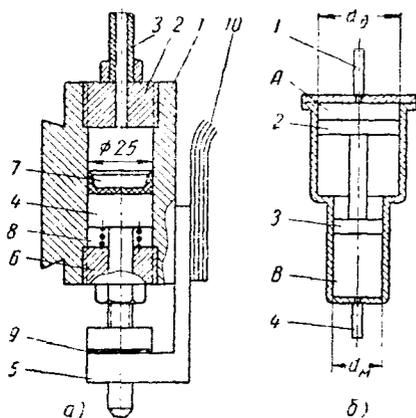
Соединение обеих камер цилиндра с сетью сжатого воздуха позволяет осуществить более сложный цикл сжатия. При поступлении сжатого воздуха в верхнюю камеру создается значительное усилие предварительного сжатия свариваемых деталей. После этого открывается доступ воздуха также в нижнюю камеру, и создается противодействие, уменьшающее усилие сжатия в момент сварки. Величина противодействия регулируется самостоятельным воздушным редуктором. Одновременно с выключением сварочного тока нижняя камера сообщается с атмосферой, противодействие исчезает, и создается значительное ковальное усилие сжатия. Для возвращения системы в исходное положение верхняя камера сообщается с атмосферой, а в нижнюю подается сжатый воздух. В описанных системах отсутствует возможность регулирования величины рабочего хода электрода. Этот недостаток устраняется при применении современных пневматических систем с трехкамерными цилиндрами (фиг. 172, б). Трехходовым краном *1* сжатый воздух непосредственно из заводской магистрали подается в верхнюю камеру цилиндра. При этом поршень *2* опускается в положение, ограничиваемое маховичком *3*, который упирается в крышку цилиндра. Для опускания верхнего электрода и сжатия свариваемых деталей воздух поступает в среднюю камеру (через редуктор *4*, воздухохранилище *12*, воздушный переключатель *5*, трехходовой кран *6*, дросселирующий клапан *7* и трубу *8*). Одновременно воздух из нижней камеры цилиндра выпускается в атмосферу через переключатель *5* и дросселирующий клапан *9*. Редуктор *4* регулируется так, чтобы давление на поршень *2* сверху всегда превышало давление на него снизу, поэтому при подаче воздуха в среднюю камеру поршень *2* остается на месте, а поршень *10* перемещается вниз, опуская связанный с ним верхний электрод машины; при этом осуществляется относительно небольшой рабочий ход электрода.

Для рабочего подъема электрода поворачивается переключатель *5*, воздух через редуктор *11* поступает в нижнюю камеру цилиндра, вытесняя в атмосферу воздух из средней камеры. Рабочий ход заканчивается при упирании поршня *10* в поршень *2*. Для установочного хода электрода верхняя камера цилиндра сообщается краном *1* с атмосферой.

а в нижнюю камеру подается сжатый воздух. Имеющиеся в системе дросселирующие клапаны служат для уменьшения скорости подъема и главным образом опускания электрода, что необходимо для устранения ударов.

Пневматический привод обеспечивает высокую производительность точечной машины благодаря скорости его срабатывания и удобному регулированию. В современных точечных машинах с пневматическим приводом удается сваривать до 80—100 точек в минуту.

В точечных машинах, предназначенных для сварки стали большой толщины, усилия сжатия электродов иногда превышают 5—6 т. При



Фиг. 173. Узлы гидросистем точечных машин:

а — гидравлическая головка; б — преобразователь давления.

этом размеры пневматического цилиндра становятся очень большими. Их уменьшение возможно при переходе на гидравлический привод с давлением рабочей жидкости (масла, иногда воды) в пределах 50—200 атм. Еще большая необходимость в применении компактного гидравлического привода возникает в многоточечных машинах, в которых при близком размещении соседних электродов применение громоздких пневматических цилиндров совершенно исключено.

Гидравлический цилиндр (головка) многоточечной машины показан на фиг. 173, а. В верхнюю часть стального корпуса 1 ввернута крышка 2 с трубкой 3 для подачи масла. Поршень цилиндра 4 связан с электрододержателем 5 через изоляционную прокладку 9. Шток имеет направление во втулке 6 и в цилиндре. Уплотнение достигается манжетой 7 из специального прессованного материала на резиновой основе (севанита). Электрод поднимается пружиной 8. Ход электрода обычно лежит в пределах до 50 мм. Электрододержатель 5 соединяется со сварочным трансформатором гибким проводом 10.

Масло в гидравлический цилиндр точечной машины может поступать непосредственно из насоса высокого давления или из преобразователя давления, схематически показанного на фиг. 173, б. Преобразователь представляет собой цилиндр с двумя камерами неодинакового диаметра. При поступлении сжатого воздуха по трубке 1 в камеру А большого диаметра на поршне 2 развивается усилие $P = p_в \frac{\pi d_в^2}{4}$. Это усилие передается соединительным штоком поршню 3, развивающему в камере В малого диаметра давление масла $p_м = \frac{4P}{\pi d_м^2} = \frac{d_в^2}{d_м^2} p_в$. Если вся гидравлическая система заполнена маслом и открыт доступ сжатого воз-

духа, то давление масла в камере В будет равно давлению воздуха в камере А.

духа в камеру A преобразователя, то в масляной системе развивается высокое давление. В отдельных случаях это давление достигает 200 атм. Преимущества гидроневматической системы — развитие значительных усилий при малых размерах рабочих цилиндров (компактность); ее недостатки — относительная сложность и возможность утечки рабочей жидкости (масла) при высоком давлении, что приводит к загрязнению рабочего места.

§ 3. ЭЛЕМЕНТЫ СВАРОЧНОГО КОНТУРА

Сварочный контур точечной машины обычно образуется двумя плечами (верхним подвижным и нижним неподвижным) и двумя электрододержателями (свечами), в которых непосредственно укрепляются электроды (см. фиг. 146). Элементы сварочного контура выполняют две в равной степени существенные функции: подвод тока к электродам и передачу им усилия, развиваемого механизмом сжатия точечной машины. Поэтому они должны, во-первых, обладать достаточной электропроводностью, надежными контактами и хорошим охлаждением и, во-вторых, иметь необходимые для передачи значительных усилий прочность и жесткость. Кроме того, конструкция элементов сварочного контура должна допускать удобное регулирование положения электродов.

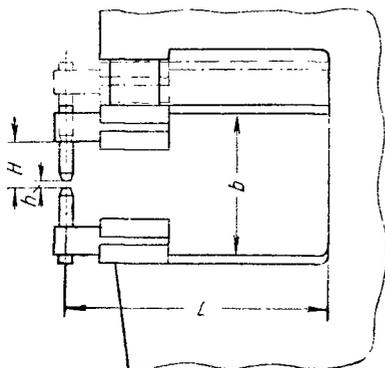
При малой жесткости сварочного контура в момент сжатия свариваемых деталей возможно взаимное смещение электродов (см. фиг. 94), ведущее к повышенному износу электродов и к ухудшению качества сварки.

Размеры сварочного контура во многих случаях ограничивают наибольшие размеры свариваемых деталей. Размеры контура определяются полезным вылетом L (фиг. 174) и расстоянием между плечами (зевом) b . Кроме того, существенное влияние на удобство сварки оказывают рабочий ход верхнего электрода h и максимальное раскрытие электродов H (в том случае, если машина имеет установочный ход электрода). Рабочий ход и раскрытие электродов зависят как от конструкции элементов сварочного контура, так и от устройства механизма сжатия.

Полезный вылет в машинах серийного выпуска лежит в пределах $250—550 \text{ мм.}$ Раствор между плечами обычно не превышает $250—300 \text{ мм.}$ Рабочий ход электродов равняется $20—40 \text{ мм.}$ Установочный ход электрода обычно равен $50—90 \text{ мм.}$

Простейшая конструкция элементов сварочного контура точечной машины малой мощности с ходом электрода по дуге окружности показана на фиг. 175, a . Верхнее плечо 1 имеет на конце отверстие для крепления электрододержателя 2 . Последний удерживается в заданном положении силой трения при затягивании болта 3 . Выдвигая плечо 1 из зажима 4 , можно регулировать его длину. Кроме того, для регулирования положения электрода можно поворачивать плечо 1 вокруг его продольной оси. Нижнее плечо 5 — литое, корытообразного сечения. Нижний электрод крепится в плече непосредственно, без специального электрододержателя. Плечо 5 имеет на конце утолщение с отверстием для надевания на круглую стойку 6 . Оно закрепляется по высоте

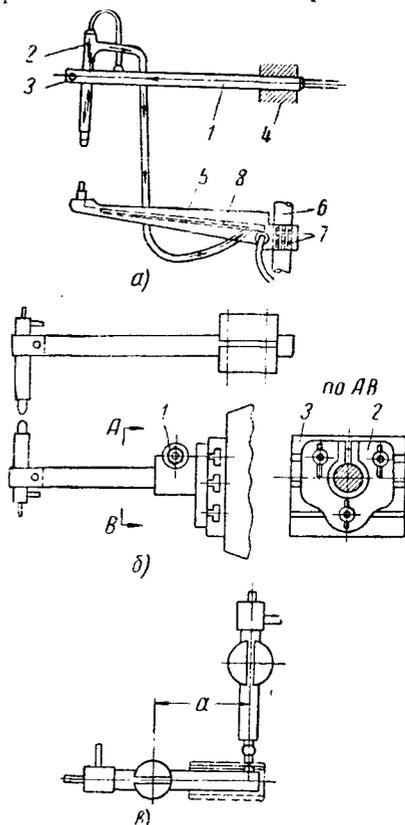
болтами 7. Трубка 8 подает охлаждающую воду. Верхнее плечо и электрододержатель изготавливаются из латуни или меди; нижнее отливается из бронзы. Недостатки конструкции — быстрый износ гнезда нижнего электрода при его частой смене; затрудненное регулирование нижнего плеча, необходимость применения верхнего и нижнего электродов не-



Фиг. 174. Основные размеры рабочего пространства точечной машины.

одинаковой формы. Более совершенная конструкция элементов сварочного контура показана на фиг. 175, б. Нижнее плечо имеет круглое сечение и зажимается болтом 1 в разрезной колодке 2 (лягушке), которая крепится тремя болтами к контактной плите 3. Отверстия для болтов в лягушке имеют овальную форму. В контактной плите для крепления лягушки предусмотрены три Т-образных паза, дающие возможность регулировать положение лягушки как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях. Кроме того, плечо может вращаться вокруг своей оси. Благодаря этому, не сменяя плеч машины, можно, например, осуществить сварку листа с трубкой (фиг. 175, в), повернув на 90° нижнее плечо и сместив его в сторону на величину a .

При вертикальном ходе верхнего электрода применяется короткое верхнее плечо, соединяемое со сварочным трансформатором гибкой шиной. В этом случае изгибающий момент, создаваемый усилием сжатия свариваемых деталей, воспринимается стальным (или чугунным) кронштейном 1, на конце которого укрепляется пневматический цилиндр 2 и направляющие для перемещения головки, в которых удерживается плечо 3 (см. фиг. 185). Для уменьшения деформаций нижнего плеча часто применяется подкос 4, длина которого может регулироваться стяжной муфтой.



Фиг. 175. Конструкция элементов сварочного контура точечной машины.

Круглые плечи имеют диаметр 50—60 мм и изготавливаются из меди (неохлаждаемые) или из латуни (при наличии водяного охлаждения). Длинным плечам иногда придается жесткая П-образная форма. В этом случае они отливаются из бронзы.

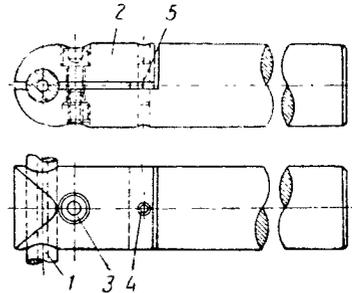
В некоторых машинах с вертикальным ходом электродов держатели упираются в регулируемые винты. В большинстве случаев крепление электрододержателя в плече осуществляется благодаря трению, развиваемому при затягивании болтов (фиг. 176). Держатель 1 прижимается колодкой 2 с помощью болта 3. Правильное положение колодки фиксируется штифтом 4. В конце колодки имеется прокладка 5, обеспечивающая ее параллельность плечу.

Электрод крепится в электрододержателе на конусе или на резьбе. На фиг. 177, а показана типовая конструкция электрододержателя с конусным креплением электрода. В электрододержатель 1 ввертывается стальная нипельная головка 2, к которой присоединяются шланги для водяного охлаждения. Внутри электрододержателя располагается тонкая медная или латунная трубка 3, по которой охлаждающая вода подается непосредственно к электроду 4. Конец этой трубки имеет косой срез, с тем чтобы при недостаточной глубине сверления канала в электроде трубка не могла упереться в его дно по всему периметру, прекратив циркуляцию воды. Вода поступает в нипель 5 и отводится через нипель 6.

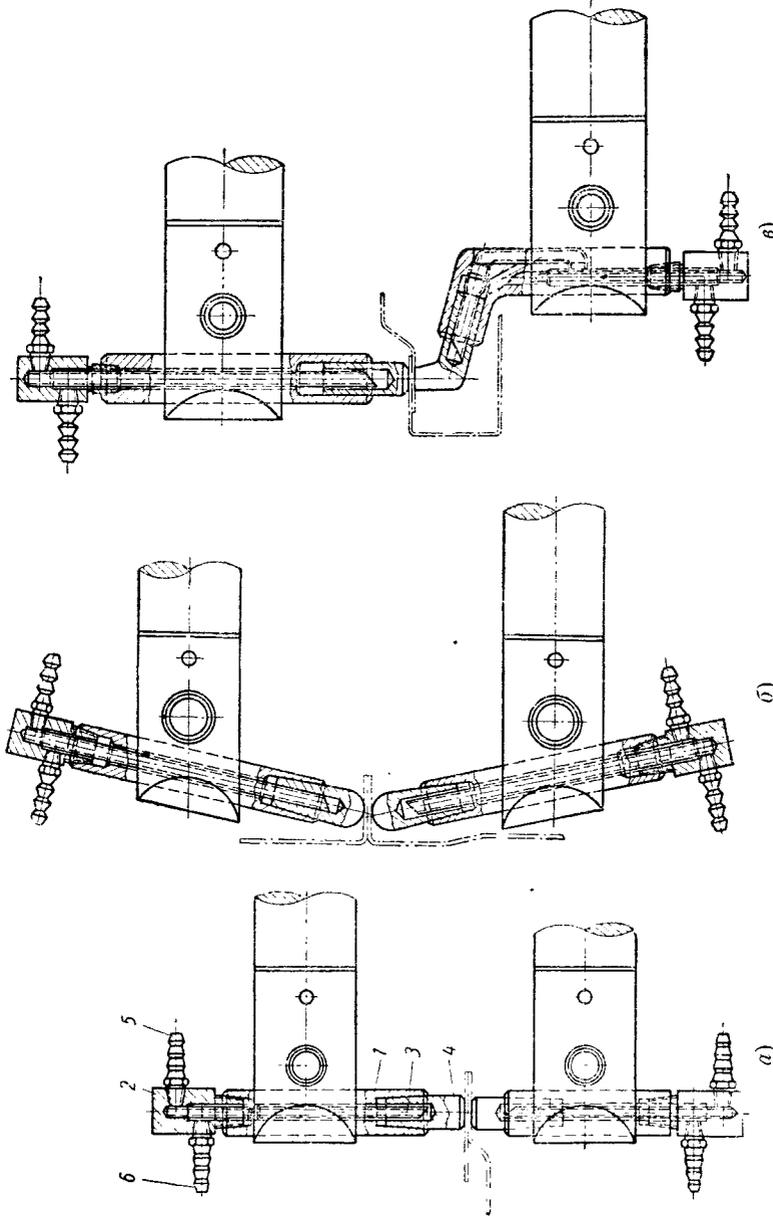
На практике широко применяются оба способа крепления электродов: конусное — главным образом на машинах мощностью до 100 кВа и резьбовое — на более мощных машинах. Однако и на машинах большой мощности конусное крепление электродов не является исключением.

В электрододержателе с резьбовым креплением электрода резьба при частой смене электродов быстро изнашивается. Так как это соединение должно быть водонепроницаемым без каких-либо прокладок (прокладки ухудшают электрический контакт между держателем и электродом), то при износе резьбы держатель приходится заменять. Для увеличения срока службы такого держателя иногда применяется конструкция с коротким промежуточным штуцером. В этом случае при износе резьбы сменяется не весь держатель, а только недорогой штуцер.

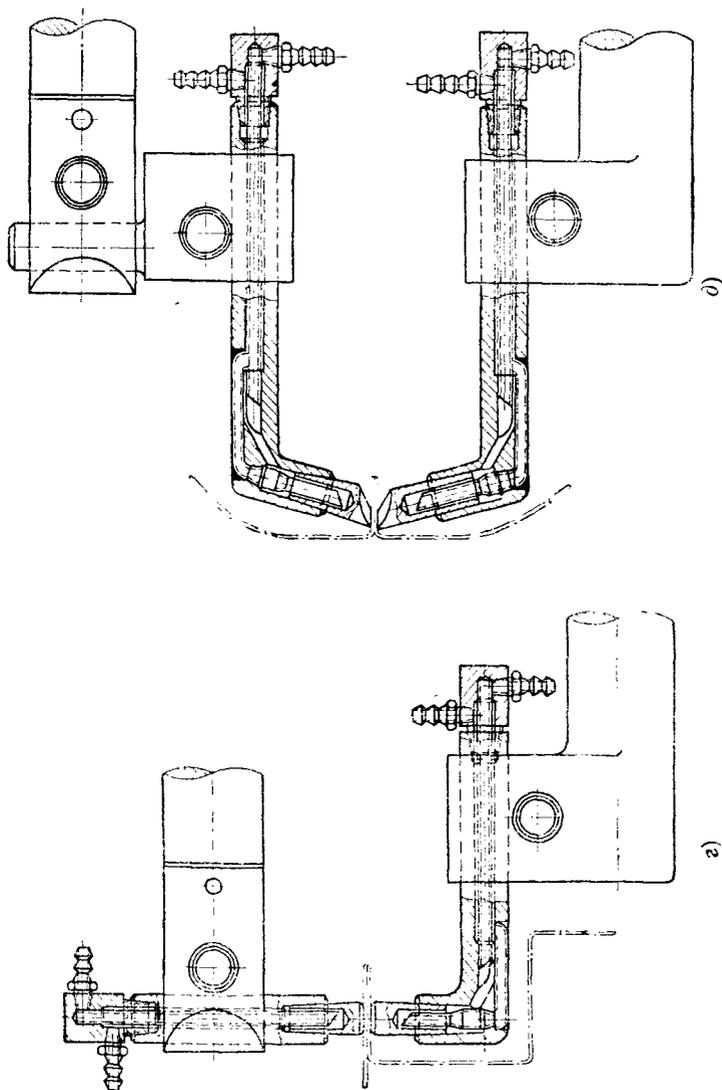
Конусное крепление электродов требует более точного их изготовления. Однако смена и установка таких электродов быстрее и удобнее, чем электродов с резьбовым креплением. Конусное крепление особенно удобно при несимметричной форме электрода, когда его правильная установка при резьбовом креплении требует вращения всего держателя вокруг своей оси.



Фиг. 176. Плечо точечной машины с отъемной колодкой для крепления электрододержателя (свечи).



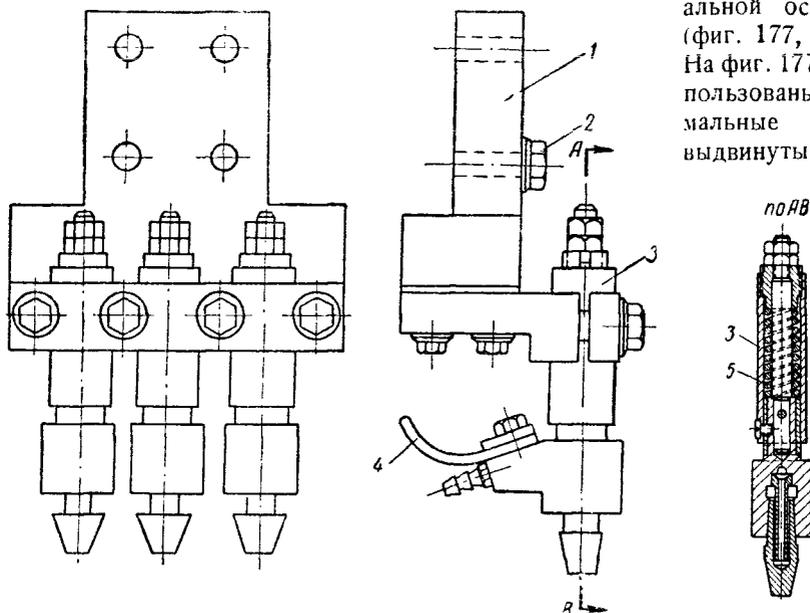
Фиг. 177 а, б в. Нормальная и специальная оснастка точечных машин (ГЛЗ им. Молотова).



Фиг. 17 а, б. Нормальная и специальная ось для торцевых машин (ГАЗ им. Молотова).

Показанная на фиг. 177, а нормальная оснастка (плечи, электродо-держатели и электроды) для точечной машины средней мощности применяется в массовом производстве (автомобильная промышленность). Электроды имеют конусное крепление. Держатели зажимаются отъемными колодками. При необходимости сварки вблизи вертикальных стенок (фиг. 177, б) применяются нормальные держатели и электроды в сочетании со специальными плечами, имеющими наклонные отверстия. При сварке в труднодоступных местах применяются различные варианты специ-

альной оснастки (фиг. 177, в—д). На фиг. 177, в использованы нормальные плечи, выдвинутые на



Фиг. 178. Электрододержатель для одновременной сварки трех точек (ГАЗ им. Молотова).

разную длину, и один специальный держатель. На фиг. 177, г показаны нормальная оснастка верхнего электрода и специальная оснастка нижнего электрода, включающая специальное плечо и специальный электрододержатель. Наконец, на фиг. 177, д иллюстрируется случай применения полностью специальной оснастки. Во всех приведенных вариантах оснастки, широко применяемой в автомобильной промышленности, электроды и держатели имеют хорошее охлаждение.

Выбор того или иного варианта оснастки определяется конфигурацией свариваемых деталей и их толщиной. При большой толщине деталей к электродам прилагаются значительные усилия. Эти усилия изгибают электрододержатели консольного типа (фиг. 177, г — нижний держатель, и фиг. 177, д) и расстраивают крепление электродов (например, нижнего электрода на фиг. 177, в). Поэтому в массовом производстве держатели консольного типа могут быть рекомендованы только при сварке деталей суммарной толщиной не более 1,5—2 мм. При большей тол-

шине деталей необходимо увеличивать сечение консольного держателя. В этом случае лучше отказаться от такого держателя.

В сварочных прессах (см. фиг. 186), предназначенных для рельефной сварки, электрододержатели заменяются контактными плитами 1 и 2. Верхняя плита 1 крепится к подвижной системе механизма сжатия, а нижняя 2 — к жесткому кронштейну станины. Ток подводится к плитам шинами. В плитах имеются Т-образные пазы для крепления электродов. В новейших отечественных прессах конструкция плит предусматривает возможность зажатия между плитой и ее опорой нормального круглого плеча 3 с электрододержателем 4 для обычной односточечной сварки (см. фиг. 186). Это расширяет возможность использования сварочных прессов при точечной сварке стальных деталей толщиной до 6—8 мм.

В некоторых случаях для более эффективного использования точечных машин большой мощности они могут быть приспособлены для одновременной сварки двух-трех точек на деталях малой толщины (1—1,5 мм). Для этой цели применяются специальные электрододержатели, в которых обеспечивается приложение к каждому электроду одинакового усилия во время сварки. Пример такого держателя приведен на фиг. 178. Корпус держателя 1 крепится болтами 2 к подвижной головке сварочной машины, имеющей вертикальный ход. В корпусе укреплены три пружинных держателя 3, имеющих каждый индивидуальный токоподвод с помощью шин 4. Усилие нажатия на каждый электрод регулируется пружиной 5. При отсутствии независимого регулирования усилия на каждом электроде не обеспечиваются одинаковые условия нагрева свариваемых точек, и достигнуть одинакового их провара практически не удается.

§ 4. ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ ТОЧЕЧНОЙ И РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКИ

Электрод — рабочий инструмент машин для контактной сварки. От качества электрода и его состояния во многом зависит качество сварки. При сварке электрод нагревается и под действием приложенного к нему усилия деформируется, что приводит к увеличению его контактной поверхности. Эта поверхность при нагреве окисляется, и увеличивается контактное сопротивление между электродом и свариваемыми деталями. Перегрев электродов и загрязнение их поверхности часто вызывают местное сваривание электрода с деталью, ведущее к прилипанию частиц свариваемого металла к поверхности электрода. Все это приводит к необходимости периодического зашлифовки рабочей поверхности электрода или к ее обработке режущим инструментом; при этом часть металла электрода удаляется — электрод срабатывается. Стоимость электродов составляет значительную часть общих затрат при точечной и рельефной сварке, а время, затрачиваемое на смену и зашлифовку электродов (обычно 4—5% общего времени сварки, иногда 10—15%), заметно сказывается на производительности труда сварщика. Повышение стойкости электродов при контактной сварке и, в первую очередь при точечной, — важная задача в области контактной сварки.

Стойкость электродов зависит от их материала и конструкции, а также от интенсивности охлаждения и режима сварки. Требования, предъявляемые к электродному материалу, зависят от назначения электродов. По назначению электроды разделяются на:

а) электроды, эксплуатируемые при значительной плотности тока на контактной поверхности (к этой группе относятся электроды для точечной, а также для роликовой сварки);

б) электроды, эксплуатируемые при относительно малой плотности тока (электроды для рельефной, а также для стыковой сварки).

Материал электродов первой группы должен обладать:

а) высокой электро- и теплопроводностью, с тем чтобы в эксплуатации электрод нагревался в минимальной степени;

б) высокой твердостью и сохранять ее до возможно более высокой температуры, т. е. иметь высокую температуру рекристаллизации;

в) малой склонностью к образованию сплавов с металлом свариваемых деталей.

Как правило, чем выше теплопроводность и твердость свариваемого металла, тем должны быть соответственно выше электропроводность и твердость материала электродов. Электроды первой группы обычно имеют электропроводность не ниже 70% электропроводности чистой меди.

Электроды второй группы при сварке нагреваются значительно меньше электродов первой группы. В то же время стоимость изготовления и периодического ремонта этих электродов из-за их сложной формы высока. Кроме того, требуется значительная точность этих электродов (например, неравномерный износ электродов для рельефной сварки ведет к неодинаковому прижатию свариваемых деталей по всем выступам и к неодинаковому провару отдельных точек). В связи с этим электроды второй группы должны обладать высокой твердостью (обычно 140—200 H_B). Их электропроводность может быть понижена до 45—55% электропроводности меди.

Для изготовления электродов первой группы применяется чистая холоднокатанная медь (медь марки М1) или ее сплавы. Находят применение двойные (медь-кадмий), тройные (медь-цинк-хром) и более сложные сплавы меди. Вводимые в медь в небольшом количестве присадки (обычно менее 1%) образуют с ней твердые растворы, твердость которых, как известно из металловедения, всегда превышает твердость исходного растворителя (в данном случае меди). Одновременно с повышением твердости понижается электропроводность твердого раствора (см. фиг. 41).

В настоящее время для изготовления электродов точечных машин, помимо холоднокатанной меди, применяются три сплава: кадмиевая бронза (0,9—1,2% Cd, остальное — медь), сплав ЭВ (хромоцинковая бронза с содержанием 0,4—0,8% Cr и 0,3—0,6% Zn) и сложный сплав МЦ4.

Кадмиевая бронза применяется при сварке легких сплавов, так как она обладает наиболее высокой после меди электропроводностью. После холодного наклепа кадмиевая бронза имеет твердость 100—120 H_B при температуре рекристаллизации 250°. Ее электропроводность достигает

90% электропроводности чистой меди. Сплав невосприимчив к термической обработке, так как не упрочняется путем старения.

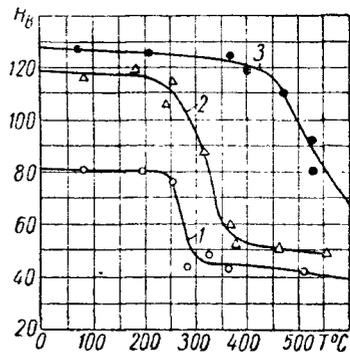
Сплав ЭВ — старейший отечественный сплав для электродов после термической обработки (закалка в воду после выдержки в течение 1 часа при 925° и отпуск — нагрев до 525°, выдержка 1 час, медленное охлаждение от 525 до 325° в течение 2 час., выдержка 6 час. при 325° и дальнейшее охлаждение на воздухе) и последующего холодного наклепа имеет твердость до 140 H_B при температуре рекристаллизации порядка 400°. При этом его электропроводность достигает 75—80% электропроводности меди. Высокая твердость после отпуска сплава ЭВ объясняется тем, что при его закалке образуется пересыщенный твердый раствор, из которого при последующем нагреве выпадают мельчайшие (дисперсные) частицы — происходит старение сплава. Выпадение этих частиц сопровождается одновременным повышением твердости сплава и его электропроводности. Электропроводность сплава растет вследствие уменьшения концентрации твердого раствора при выпадении из него дисперсных частиц в процессе старения.

Сплав МЦ4 обладает значительной твердостью, высокой температурой рекристаллизации и электропроводностью, делающей его вполне применимым при точечной сварке стали. Сплав восприимчив к дисперсионному твердению. Дополнительное повышение твердости литого сплава МЦ4 достигается его холодным наклепом. Вследствие малой окислительной способности сплава МЦ4 он при сварке стали превосходит по стойкости другие применяемые для этой цели сплавы.

Сплавы ЭВ и МЦ4 могут успешно применяться также при изготовлении электродов для рельефной сварки.

Следует иметь в виду, что при перегреве электрода его твердость и последующая стойкость могут резко понижаться. Поэтому очень важно для продления срока службы электродов, чтобы электроды хорошо охлаждались. Опасная степень перегрева электродов зависит от температуры рекристаллизации применяемого электродного материала. Снижение твердости в результате двухчасовой выдержки при различных температурах меди (1), кадмиевой бронзы (2) и сплава ЭВ (3) показано на фиг. 179. Начало резкого понижения твердости соответствует температуре рекристаллизации.

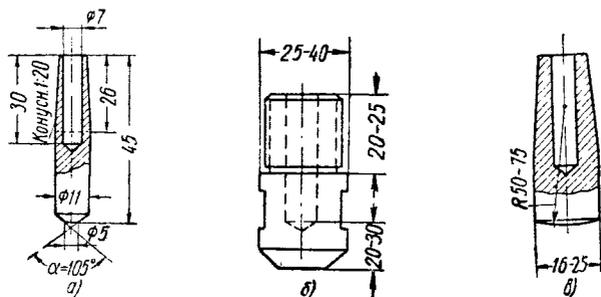
Конструкция нормальных электродов с конусным и резьбовым креплением в держателе показана на фиг. 180, а и б. Конусность обычно составляет 1 : 20. Для удобства смены электродов с резьбовым креплением на них всегда предусматриваются лыски под ключ. Иногда такие



Фиг. 179. Зависимость твердости при комнатной температуре холоднокатанной меди (1), кадмиевой бронзы (2) и сплава ЭВ (3) от температуры отпуска длительностью 2 часа.

лыски делаются и на электродах с конусным креплением. Рабочая часть электрода имеет цилиндрическую или коническую форму. При этом контактная поверхность электрода может быть плоской (фиг. 180, *a* и *b*) или сферической (фиг. 180, *в*).

При сварке конструкционных сталей наиболее часто применяются электроды с конической рабочей частью и плоским контактом. Электроды этого типа с конусным креплением могут быть относительно легко получены путем холодной высадки на прессе. При этом образуется также и внутреннее отверстие в электроде, необходимое для его водяного охлаждения. Высадка электродов — наиболее совершенный способ их изготовления, обеспечивающий минимальную трудоемкость и почти полное отсутствие потерь металла в стружку. Высадка применима в массовом производстве электродов.



Фиг. 180. Конструкция нормальных электродов для точечной сварки.

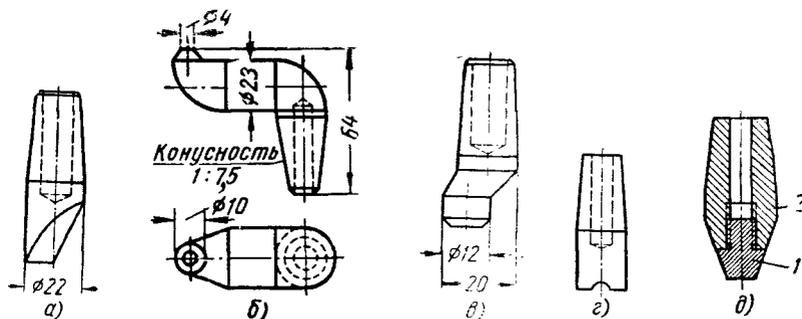
Диаметр контактной поверхности d_3 обычно определяется толщиной свариваемых деталей и требованиями технологического процесса. Угол конуса рабочей части α изменяется от 30 до 150°. Чем больше этот угол, тем труднее деформируется электрод и тем выше его стойкость. Чрезмерное увеличение угла α затрудняет зашлифовку электрода. Обычно $\alpha = 90 \div 105^\circ$.

Электроды со сферической контактной поверхностью применяются при сварке легких сплавов, а также при сварке стальных деталей большой толщины. В отдельных случаях электроды этого типа применяются при сварке стальных деталей малой толщины, но при наклонном положении электрода (см. фиг. 177, *б*). При сферической поверхности большого радиуса уменьшается глубина вмятин на поверхности свариваемых деталей и облегчается получение хорошего контакта в начале сварки. Кроме того, при сферических электродах перекося деталей меньше влияет на качество сварки. Недостаток электродов со сферической поверхностью — относительно трудное поддержание ее правильной формы в эксплуатации. Радиус сферы обычно равен 50—75 мм. Иногда при сварке наклонным электродом стальных деталей малой толщины он уменьшается до 6—8 мм.

Интенсивность охлаждения оказывает решающее влияние на стойкость электродов в эксплуатации. Охлаждение электрода зависит от его массы и от размеров и расположения каналов для циркуляции воды.

С увеличением мощности точечной машины и длительности включения сварочного тока следует увеличивать размеры электродов. Диаметр цилиндрической части электрода для машин мощностью до 50 *кв*а обычно лежит в пределах 11—16 *мм*. В машинах мощностью 50—75 *кв*а он увеличивается до 20—25 *мм*, а в машинах мощностью 100 *кв*а и выше — до 30—40 *мм*.

Расстояние от дна внутреннего канала до контактной поверхности нового электрода не должно превышать 15—20 *мм*. При большем расстоянии снижается эффективность водяного охлаждения электрода. Расстояние от конца трубки водяного охлаждения до дна канала не



Фиг. 181. Специальные электроды для точечной сварки.

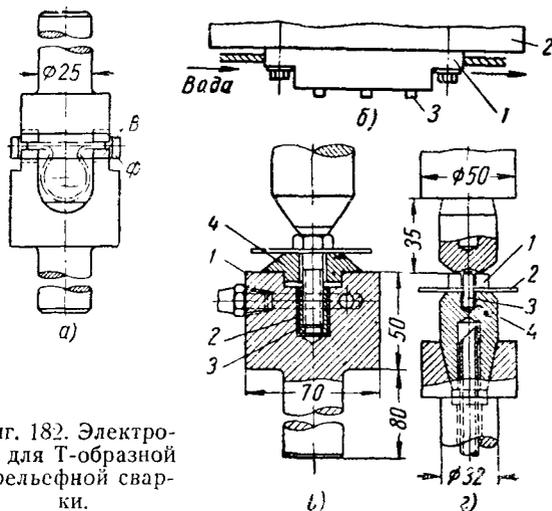
должно превышать 5—6 *мм* (см. фиг. 177). При большем расстоянии затрудняется доступ холодной воды к концу электрода, и его охлаждение заметно ухудшается.

Помимо нормальных типов электродов, в промышленности широко применяются различные электроды специальной формы, необходимость в которых обычно возникает при сварке в труднодоступных местах.

При сварке узких отбортованных деталей применяются прямые или изогнутые электроды со смещением рабочей части (фиг. 181, *а* и *б*), а также с ее утоньшением (фиг. 181, *в*). Стойкость электродов со смещенной рабочей частью ниже стойкости нормальных электродов вследствие ухудшенных условий охлаждения, связанных с увеличением расстояния от контактной поверхности до дна канала водяного охлаждения. Хорошие результаты при сварке деталей малой толщины дают изогнутые держатели в сочетании с нормальными хорошо охлаждаемыми электродами (см. фиг. 177, *д*).

Иногда форма контактной поверхности электрода определяется формой свариваемых деталей. Например, при сварке вкрест круглых стержней в электродах иногда делают канавки, фиксирующие положение свариваемых деталей (фиг. 181, *з*). Верхний и нижний электроды могут иметь неодинаковую форму. Например, для уменьшения глубины вмятин на лицевой поверхности свариваемого изделия применяются один электрод нормальной формы, а другой электрод с контактной площадкой большого диаметра или сферической контактной поверхностью большого радиуса, например, 150—250 *мм*.

В отдельных случаях для уменьшения расхода цветного металла применяются составные электроды, снабжаемые небольшими наконечниками 1, запрессовываемыми или ввертываемыми в конец основного электрода 2 (фиг. 181, д). При износе электрода сменяется только его небольшой наконечник. Недостатки составных электродов — усложнение изготовления и возможность утечки воды при неплотности в резьбе.



Фиг. 182. Электроды для Т-образной и рельефной сварки.

Электроды для рельефной сварки представляют собой держатель, который укрепляется в плече точечной машины (если рельефная сварка производится на мощной точечной машине) или привертывается болтами к плите сварочного пресса, с отдельными впаиваемыми или ввернутыми на резьбе вставками, расположенными в местах выштампованных выступов на свариваемых деталях. Электрод первого типа показан на фиг. 182, а. Он снабжен фиксатором Φ , определяющим положение свариваемых деталей при их установке. Электрод второго типа с охлаждаемым водой держателем 1, привернутым болтами к контактной плите 2 пресса, схематически изображен на фиг. 182, б. Электрод снабжен вставками В из сплава высокой твердости.

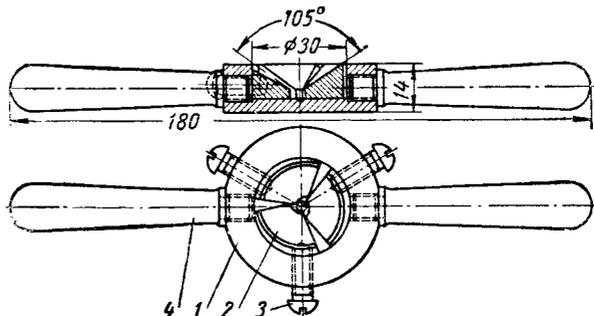
На фиг. 182, в и г показаны электроды для Т-образной сварки на точечной машине. Электрод для приварки болта (фиг. 182, в) состоит из держателя 1, в отверстие которого вставлены миканитовая изоляционная втулка 2 и стальная направляющая втулка 3. В верхнюю часть держателя впаива вставка 4, изготовленная из электродного сплава высокой твердости. В электроде для Т-образной приварки гайки 1 к листу 2 (фиг. 182, г) стальной направляющий штырь 3 изолирован от нижнего электрода втулкой 4.

Нормальная эксплуатация электродов сводится к поддержанию заданных размеров и формы их рабочей части и к обеспечению чистоты контактной поверхности. Для этого сварщик периодически очищает контактную поверхность электродов наждачной бумагой или личным напильником, опиливает профиль электрода напильником или обрабатывает его специальным инструментом-заправником без снятия электродов с машины. Кроме того, сильно деформированные электроды ремонтируются путем обточки на токарном станке. Иногда изношенные электроды наплавляются медью. Стойкость наплавленного электрода значительно ниже стойкости электрода, изготовленного из холоднокатанной

меди, и, тем более, электрода из специальных сплавов. Для повышения стойкости наплавки ее целесообразно наклепать ударами молотка.

Необходимая частота очистки контактной поверхности электродов зависит от марки электродного сплава и, в первую очередь, от рода свариваемого материала. При сварке хорошо очищенной малоуглеродистой стали электроды

могут зачищаться после сварки каждые 300—500 точек. При сварке алюминиевых сплавов зачистка электродов необходима после сварки 30—50 точек. Частая зачистка в последнем случае вызывается тем, что при окисленной поверхности электрода частицы меди сплавля-



Фиг. 183. Заправник для электродов (В. П. Якушкин).

ются с алюминием, резко понижая коррозионную стойкость алюминиевого сплава. Для сохранения параллельности контактных поверхностей верхнего и нижнего электродов при их зачистке ее удобно производить, слегка зажимая между электродами пластинку, обернутую наждачной шкуркой, и вращая ее вокруг оси электродов. Для восстановления профиля рабочей части электродов можно применять специальный заправник (фиг. 183), представляющий собой кольцо 1 со вставными ножами 2, регулируемые винтами 3. Заправник зажимается между электродами и поворачивается вокруг их оси рукоятками 4. При этом с контактной поверхности электродов снимается небольшая стружка и восстанавливается ее первоначальный профиль.

При сварке на жестких режимах малоуглеродистой стали толщиной до 2—3 мм электродами из холоднокатанной меди с хорошим водяным охлаждением одна пара электродов может быть использована для постановки 20 000—30 000 точек. Стойкость электродов из сплава ЭВ или МЦ4 в этих условиях будет в 3—5 раз выше. Вес G_2 изношенного электрода для точечной сварки обычно составляет 75—80% веса G_1 нового. Таким образом, коэффициент использования металла электрода

$$\frac{G_1 - G_2}{G_1} = 0,2 \div 0,25.$$

§ 5. ХАРАКТЕРИСТИКА СЕРИЙНЫХ ОДНОТОЧЕЧНЫХ СТАЦИОНАРНЫХ МАШИН И СВАРОЧНЫХ ПРЕССОВ

Техническая характеристика серийных точечных машин этого класса приведена в табл. 19. Серийные точечные машины могут быть отнесены к одной из трех групп:

а) *неавтоматические машины с педальным приводом* механизма сжатия и включения (серия машин типа АТП);

Характеристики серийных стацио

Показатели	Единица измерения	Тип	
		АТП-10	АТП-25
Первичное напряжение	<i>в</i>	220, 380	220, 380
Номинальная мощность	<i>кВа</i>	10	25
Номинальная продолжительность включения (ПВ)	<i>%</i>	30	25
Номинальный ток в первичной цепи	<i>а</i>	45, 26	115, 66
Число ступеней регулирования трансформатора	шт.	8	6
Пределы регулирования вторичного напряжения холостого хода	<i>в</i>	1,6—2,6	2,0—3,5
Характер действия машины	—		Неавтомат
Привод механизма сжатия	—		Педа
Ход верхнего электрода			По дуге
Максимальное усилие, развиваемое на электродах	<i>кг</i>	100	125
Давление сжатого воздуха	<i>ати</i>	—	—
Полезный вылет	<i>мм</i>	250	250
Рабочий ход электродов	"	20	20
Максимальное раскрытие электродов	"	100	125
Управление сварочным циклом	—		Педа
Тип включателя	—		Меха
Максимальный сварочный ток при номинальной мощности	<i>а</i>	~ 6000	~ 9000
Максимальное число сварок в час при автоматической работе	шт.	—	—
Число сварок в час при неавтоматической работе	"	1000—2000	800—2000
Длительность протекания тока при автоматической сварке точки	сек.	—	—
Максимальная толщина свариваемых деталей из малоуглеродистой стали при автоматической работе	<i>мм</i>	—	—
Максимальная толщина свариваемых деталей из малоуглеродистой стали при неавтоматической работе в серийном производстве	"	1,5+1,5	2+2
Мощность электродвигателя	<i>квт</i>	—	—
Расход охлаждающей воды	<i>л/час</i>	120	120
Габариты: высота	<i>мм</i>	1075	1075
ширина	"	480	480
глубина	"	1000	1000
Вес	<i>кг</i>	300	350

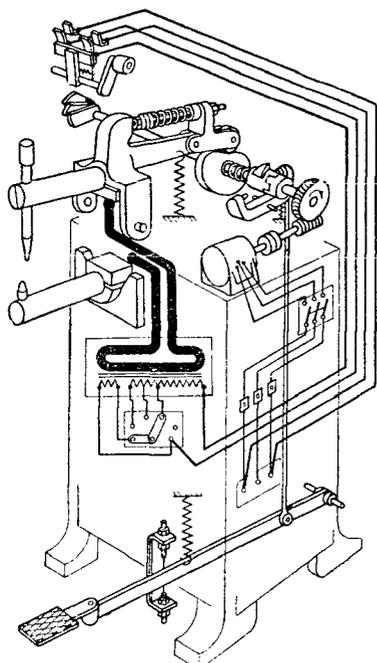
Таблица 19

Парных точечных машин

МОДЕЛИ

АТП-50	АТП-75	МТМ-50 (МТМ-75)	МТП-75-5 (МТП-100)	МТП-150 (МТП-200)	МТП-300 (МТП-400)
220, 380 50	220, 380 75	220, 380 50 (75)	380 75 (100)	380 150 (200)	380 300 (400)
12,5 230, 131	12,5 345, 197	12,5 230, 131 (345, 197)	20 197 (263)	20 395 (526)	20 390 (1052)
6	8	6 (8)	8	8	8
2,9—5,0	3,5—7,0	2,5—5,0 (3,9—7,0)	3,6—6,0 (3,5—7,2)	4,6—8,1 (4,7—8,4)	4,6—9,3 (5,1—10,3)
тический льный окружности		Автоматический с возможностью неавтоматической работы Электрический Пневматический			
250	350	250 (350)	550 (700)	1400	3200
—	—	—	5,5	5,5	5,5
350	350	300	500	500	550
20	20	40	30	30	30
160	160	150	275	250	250
льное ический		Кулачковое	Электронным реле времени Игнитронный		
~ 11 500	~ 14 000	~ 10 000 (~ 12 000)	~ 15 000 (~ 19 000)	~ 21 000 (~ 26 000)	~ 32 000 (~ 40 000)
—	—	3000	5400	3900	2400
800—2000	800—2000	800—2000	600—1000	400—600	400—600
—	—	0,15—0,35		0,04—6,5	
—	—	2+2 (2,5+2,5)	2,5+2,5 (4+4)	5+5 (6+6)	7+7 (8+8)
3+3	3,5+3,5	3,5+2,5 (3,5+3,5)	3,5+3,5 (5+5)	6+6 (7+7)	8+8 (10+10)
—	—	0,25	—	—	—
300	300	400 (500)	600	800	1200
1290	1290	1290	2100	2225	2650
635	635	655	750	750	795
1020	1020	1025	1590	1435	1550
600	650	400 (480)	930 (1000)	~ 1100 (~ 1200)	~ 1400 (~ 1500)

б) автоматические машины с электрическим приводом и кулачковым управлением (машины типа МТМ, а также машины довоенного выпуска типа АТА-40, АТА-100, АТА-175 и др.);



Фиг. 184. Электрокинематическая схема точечных машин МТМ-50 и МТМ-75.

в) автоматические машины средней и большой мощности с пневматическим приводом (типа МТП).

Машины первой группы, как правило, имеют перемещение верхнего электрода по дуге окружности. Они обычно снабжаются механическим выключателем. Усилие, прилагаемое сварщиком к педали, передается электродам через рычаги и регулирующую пружину. Выключение тока осуществляется при увеличенном давлении на электроды. При установке электромагнитного контактора и реле времени возможна автоматизация выключения сварочного тока.

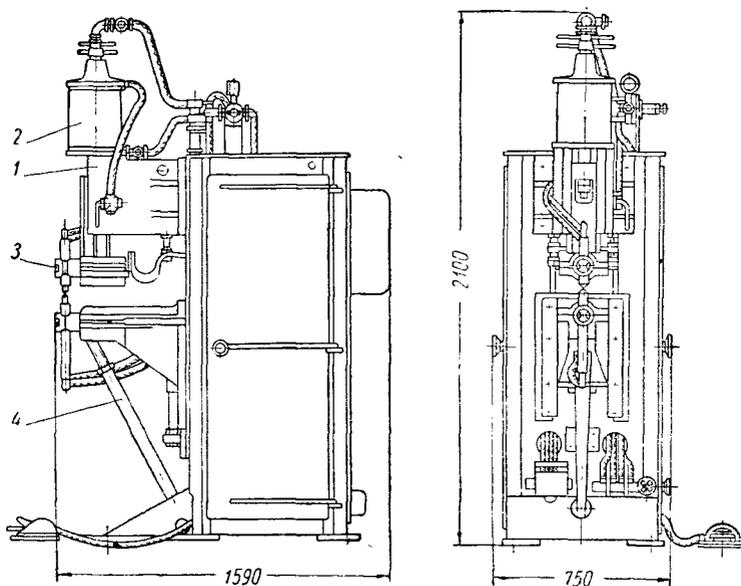
Машины мощностью до 5 *кв*а часто устанавливаются на верстаке. При большей мощности они устанавливаются непосредственно на полу. Электрокинематическая схема точечной машины типа АТМ-10 показана на фиг. 10, а ее краткое описание дано в гл. I.

Электрокинематическая схема точечных машин типа МТМ-50 и МТМ-75 дана на фиг. 184. Перемещение верхнего электрода в этих машинах происходит по дуге окружности. Машины приспособлены как для автоматической,

так и для неавтоматической работы. Схема кулачкового механизма сжатия и включения была рассмотрена выше (см. фиг. 171). Машины снабжены механическим выключателем. Для высокопроизводительных машин этого типа применение электромагнитного контактора было бы более оправданным. В довоенный период точечные машины с электрическим приводом мощностью от 20 до 175 *кв*а были выпущены в значительном количестве и широко применялись главным образом в массовом производстве. Часть машин мощностью 40 *кв*а и все машины большей мощности выпускались с вертикальным ходом верхнего электрода.

В настоящее время выпуск машин с электрическим приводом ограничен, несмотря на относительную их простоту и дешевизну. Это объясняется двумя существенными недостатками описываемых машин: нерегулируемостью длительности полного сварочного цикла и непостоянством усилия, развиваемого на электродах. Первое ограничивает развитие стахановских методов сварки, второе ведет к нестабильности качества сварных точек.

Машины третьей группы с пневматическим приводом свободны от недостатков, свойственных машинам с электрическим приводом. Они выпускаются мощностью 75, 100, 150, 200, 300 и 400 *кв*. Машины имеют вертикальный ход верхнего электрода. Машины, помимо рабочего хода электрода, имеют установочный ход (пневматическая схема этих машин была показана на фиг. 172, б). Машина мощностью 75 *кв* (фиг. 185) снабжается или электромагнитным контактором, или игнитронным включателем (см. фиг. 141). Автоматизация цикла сварки осуще-



Фиг. 185. Общий вид точечной машины МТП-75-5.

ствляется многопозиционным электронным реле времени, с помощью которого, в частности, можно легко регулировать полную длительность сварочного цикла, определяющую производительность процесса. Пневматическая система машины снабжена дросселирующими клапанами, ограничивающими скорость перемещения верхнего электрода и предупреждающими, таким образом, удары при зажатии свариваемых деталей между электродами.

Более мощные машины этой серии снабжаются реле времени, дающими возможность включения сварочного тока последовательными короткими импульсами, что несколько облегчает точечную сварку стальных деталей толщиной более 5—6 *мм*.

По конструктивному оформлению машины мощностью 75, 150 и 300 *кв* соответственно не отличаются от машин мощностью 100, 200 и 400 *кв*, за исключением установки в последних более мощных трансформаторов.

Сварочные прессы выпускаются мощностью от 150 *кв* и выше. По конструктивному оформлению они почти не отличаются от точечных

Таблица 20

Характеристика серийных прессов для рельефной сварки

Показатель	Единица измерения	Тип пресса		
		МРП-150-3 (МРП-200-3)	МРП-300 (МРП-400-1)	МРП-600
Первичное напряжение	<i>в</i>	380	380	380
Номинальная мощность	<i>кВа</i>	150 (200)	300 (400)	6 0
Номинальная продолжительность включения (ЛВ)	<i>0/0</i>	20	20	20
Номинальный ток в первичной цепи	<i>а</i>	395 (526)	790 (1052)	1580
Число ступеней регулирования трансформатора	<i>шт.</i>	8	8	16
Пределы регулирования вторичного напряжения холостого хода	<i>в</i>	4,65—8,1 (4,75—8,45)	~ 4,63—9,27 (~ 5,18—10,3)	7,3—12,7
Характер действия машины		Автоматический Пневматический		
Привод механизма сжатия		Автоматический Пневматический		
Максимальное усилие на электродах	<i>кг</i>	1600	3500	5500
Давление сжатого воздуха	<i>ати</i>	5,5	5,5	5,5
Полезный вылет (от центра плиты)	<i>мм</i>	340	340	300
Рабочий ход верхней плиты	<i>"</i>	30	30	40
Установочный ход верхней плиты	<i>"</i>	70	90	110
Вертикальное регулирование нижней плиты	<i>"</i>	160	160	200
Расстояние между плитами (наименьшее или наибольшее)	<i>"</i>	50/225	50/250	100/450
Размеры плит (ширина, глубина)	<i>"</i>	200×200	250×250	400×300
Управление сварочным циклом	<i>—</i>	Электронным регулятором времени		
Пределы регулирования длительности включения сварочного тока	<i>сек.</i>	0,04—6,5	0,04—6,5	0,04—6,5
Максимальное число ходов в час	<i>шт.</i>	3600	2400	1800
Тип включателя	<i>—</i>	Игнитронный, асинхронный		
Сварочный ток при номинальной мощности	<i>а</i>	~ 21 000 (~ 25 000)	~ 32 000 (~ 40 000)	~ 48 000
Расход охлаждающей воды	<i>л/час</i>	800	1200	1500
Расход сжатого воздуха	<i>м³/час</i>	6	12	15
Габариты: высота	<i>мм</i>	2225	2650	3030
ширина	<i>"</i>	750	795	905
глубина	<i>"</i>	1435	1550	1650
Вес	<i>кг</i>	1106 (1200)	~ 1400 (~ 1500)	~ 2000

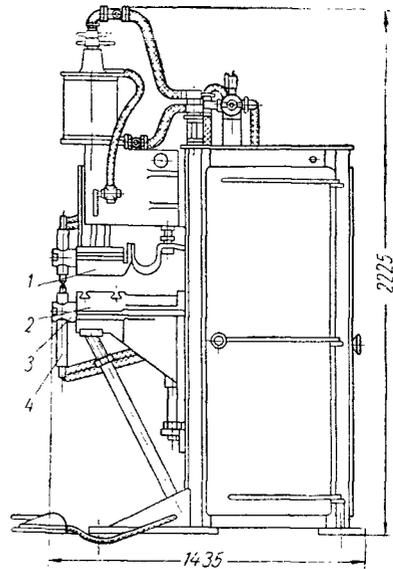
машин типа МТП соответствующей мощности. Прессы имеют контактные плиты для рельефной сварки (фиг. 186) и нормальную оснастку для однотоочечной сварки. Характеристика прессов приведена в табл. 20. Число одновременно свариваемых точек зависит от толщины стали (см. § 1 гл. VI)

§ 6. ПЕРЕНОСНЫЕ ТОЧЕЧНЫЕ МАШИНЫ

Часто подача громоздкого изделия к стационарной точечной машине и установка его в необходимое для сварки положение представляют значительные трудности; в то же время использование специализированных многоточечных машин не оправдывается из-за ограниченного объема производства. В этом случае целесообразно применение различных переносных и подвесных устройств для точечной сварки.

Применяются два основных типа переносного оборудования для точечной сварки. В первом изделие собирается и сваривается в кондукторе 1, соединяемом с одним из выводов сварочного трансформатора 2, второй вывод которого соединяется гибким проводом с рабочим инструментом — пистолетом 3, устанавливаемым в месте сварки вручную (фиг. 187, а). В оборудовании второго типа (фиг. 187, б) изделие 1 собирается свободно или в приспособлении, не связанном со сварочным трансформатором 2. В этом случае оба вывода сварочного трансформатора соединяются гибкими проводами с рабочим инструментом — клещами 3. Преимущество оборудования первого типа: относительно высокая производительность труда (в отдельных случаях до 120 сварных точек в минуту и выше, обусловленная легкостью и удобством рабочего инструмента). Его недостатки — сложность кондуктора и ограниченная толщина свариваемых деталей из-за малого усилия сжатия, развиваемого вручную сварщиком. При использовании пистолета с пневматическим или гидравлическим приводом механизма сжатия электродов (сварочного домкрата, см. фиг. 101, в) это ограничение отпадает. Преимущества оборудования второго типа (сварочных клещей) — большая универсальность и отсутствие необходимости в сложных кондукторах. Его недостатки — относительно низкая производительность труда и значительная утомляемость оператора.

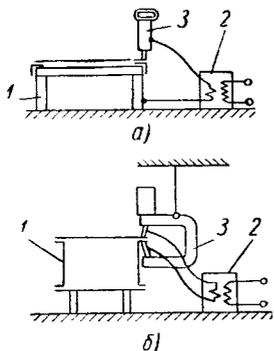
Схематический разрез сварочного пистолета показан на фиг. 188. При нажатии на рукоятку 1 заданным усилием электрод с держателем 2 сжимают пружину 3, приводя колодку 4 с контактами вспомогательной цепи в верхнее положение. Если при этом нажать кнопку 5, то



Фиг. 186. Общий вид сварочного прессы МРП-150-3.

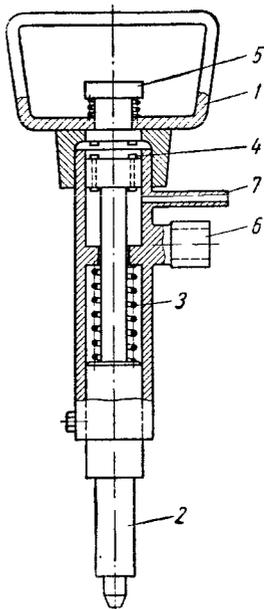
включается сварочный ток. Длительность его включения обычно регулируется размещенным отдельно от пистолета электронным или пневматическим реле времени. Гибкий провод от трансформатора вводится во втулку 6, провода цепи управления — в трубку 7.

В практике массового производства, там где это возможно, в настоящее время стремятся заменить относительно мало надежный пистолет с ручным нажатием более совершенным и очень удобным в работе сварочным домкратом. Сварочный домкрат требует установки в кондукторе дополнительных жестких шин, идущих параллельно основным шинам кондуктора, поддерживающим изделие в местах постановки сварных точек. Устройство особенно удобно, если дополнительные



Фиг. 187. Схема переносного оборудования для точечной сварки:

a — сварка в кондукторе пистолетом;
б — сварка в приспособлении клещами.



Фиг. 188. Конструкция пистолета для точечной сварки.

шины — токоведущие (соединяемые со вторым выводом сварочного трансформатора и изолированные от основных шин главного кондуктора), так как в этом случае сварочный домкрат свободен от громоздких сварочных кабелей, имеет минимальный вес и без труда устанавливается в требуемое положение вдоль шин кондуктора.

Достаточно широко применявшаяся в автомобилестроении сварка рычагом (см. фиг. 101, *a* и *б*) в последнее время уступает место сварке домкратами.

Подвесные точечные машины бывают двух типов: с размещением трансформатора в корпусе клещей и с отдельно расположенным трансформатором. Машины первого типа тяжелы и малопроизводительны, они не получили широкого промышленного применения. Машины второго типа очень успешно используются в массовом производстве и, в частности, в автомобилестроении.

Серийные подвесные машины МТПГ-75 и МТПГ-150 строятся по второму типу. Их краткая характеристика дана в табл. 21. Машины

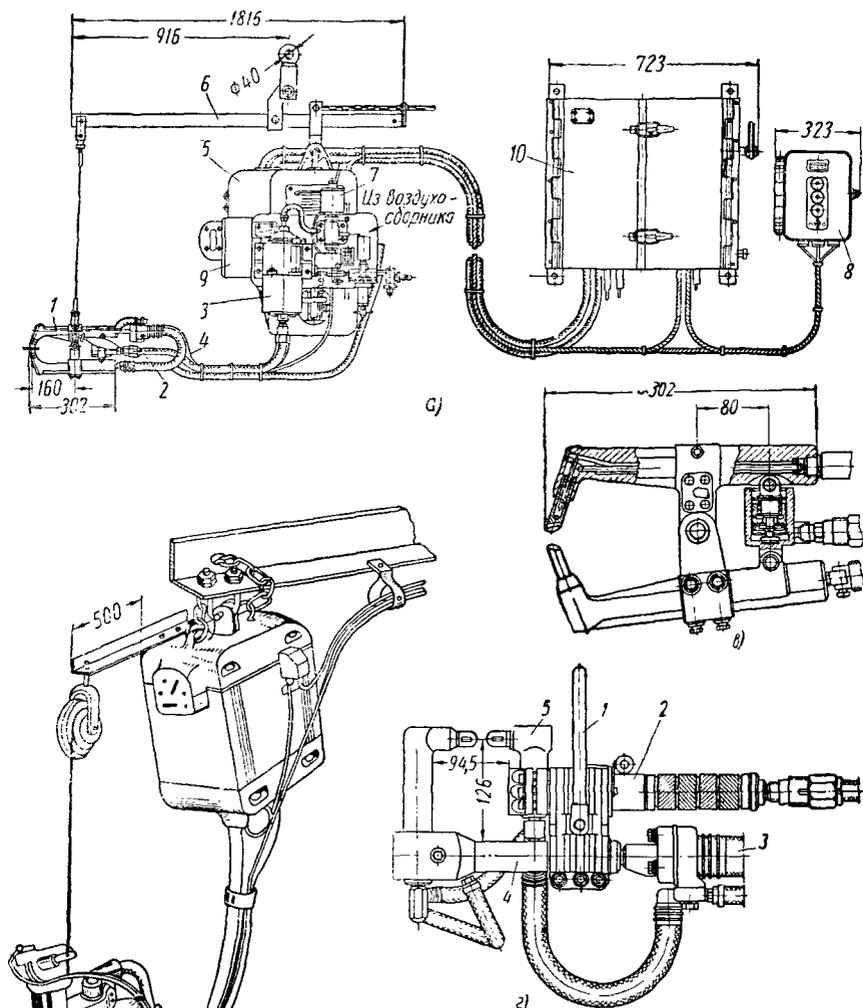
Таблица 21

Характеристика серийных подвесных точечных машин

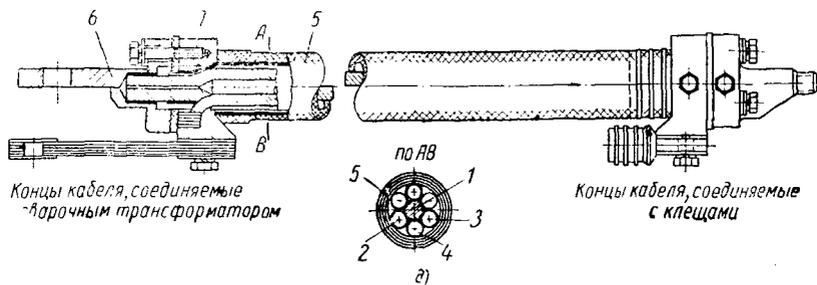
Показатель	Единица измерения	Тип машины	
		МТПГ-75	МТПГ-150
Первичное напряжение	<i>в</i>	380	380
Мощность	<i>кВа</i>	75	150
Номинальная продолжительность включения (ПВ)	<i>%</i>	25	25
Максимальная толщина свариваемых деталей (малоуглеродистая сталь):			
при автоматическом управлении	<i>мм</i>	1,5+1,5	4+4
при неавтоматическом управлении	"	2,5+2,5	6+6
Максимальное число ходов в час при автоматическом управлении	<i>шт</i>	4800	2400
Число ступеней регулирования	"	16	16
Пределы регулирования вторичного напряжения	<i>в</i>	5,06—19	5,85—21,1
Привод механизма сжатия	—	Пневмогидравлический	
Управление циклом сварки	—	Электронным регулятором времени	
Пределы длительности включения сварочного тока	<i>сек.</i>	0,04—6,5	0,04—6,5
Тип клещей	—	КТГ-75-1, КТГ-75-2, КТГ-75-3	КТГ-150-1

отличаются друг от друга мощностью трансформатора и конструкцией клещей. Они состоят из следующих главных узлов (фиг. 189, *а*): клещей 1 (машина допускает присоединение клещей различных типов), шланга 2, по которому масло давлением до 100 *атм* поступает из пневмогидравлического преобразователя давления 3 (см. схему на фиг. 173, *б*), кабеля 4, соединяющего трансформатор 5 с клещами, подвески 6, электропневматического клапана 7, электронного регулятора времени 8, управляющего циклом сварки, секционного переключателя 9 и шкафа 10 с игнитронным включателем (или синхронизированным контактором). Схема подвески клещей и трансформатора показана на фиг. 189, *б*.

Конструкция клещей определяется размерами и формой свариваемых деталей. Клещи типа КТГ-75-3 с движением электрода по дуге окружности показаны на фиг. 189, *в*. Полезный вылет этих клещей 140 *мм*. Они могут развивать на электродах усилие до 250 *кг*. Вес этих клещей без кабелей и шлангов 9 *кг*. На фиг. 189, *г* изображены клещи с прямолинейным ходом электрода типа КТГ-75-2, имеющие полезный вылет 125 *мм* и развивающие усилие до 200 *кг*. Клещи поддерживаются подвеской 1 и направляются во время сварки рукояткой 2, внутри которой размещен гидравлический цилиндр. Ток подводится к клещам кабелем 3, один провод которого присоединяется к жесткой скобе 4, а другой — к головке 5 с движущимся электродом.



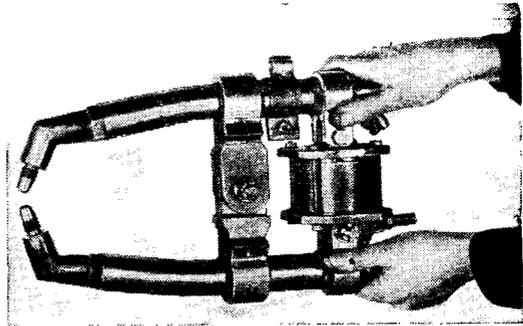
Фиг. 189. Подвесная машина для точечной сварки:
 а — общий вид установки; б — подвеска трансформатора и клещей; в — разрез клещей КТГ-75-3; г — конструкция бифилярного кабеля с малым реактивным сопротивлением.



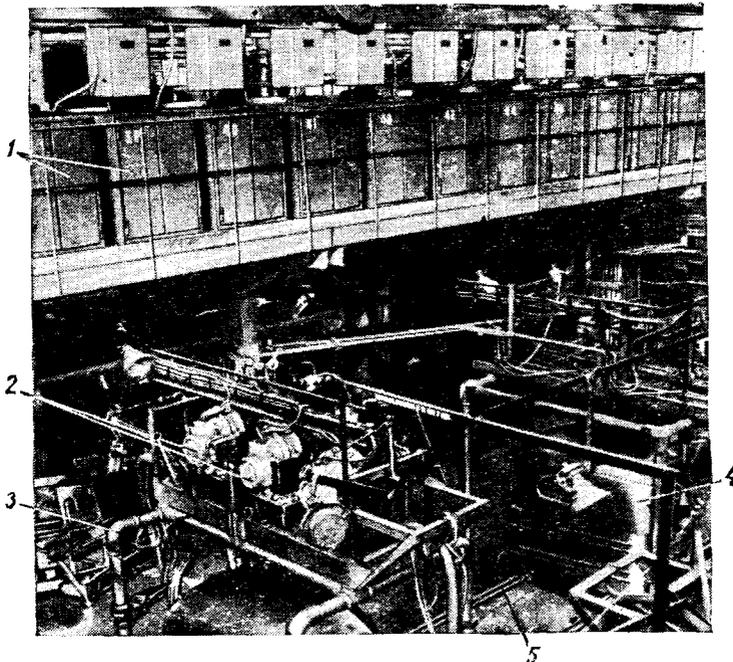
Концы кабеля, соединяемые
сварочным трансформатором

Концы кабеля, соединяемые
с клещами

В подвесных машинах применяется кабель с малым реактивным сопротивлением. В этом кабеле вокруг резинового стержня 1 (фиг. 189, д) располагаются три помещенные в резиновую трубку 3 медные жилы 2 одного провода (сечением 150 мм^2 каждая) и три жилы 4 второго, обратного провода. Провода пропускаются через резиновый шланг 5, в котором может циркулировать охлаждающая вода. Концы медных жил припаиваются к изолированным наконечникам 6 и 7. Благодаря переплетению прямого и обратного проводов индуктивное сопротивление кабеля очень мало. Наличие интенсивного водяного охлаждения дает возможность применить большую плотность тока в кабеле (до 80 а/мм^2). Это при-



Фиг. 190. Легкие клещи с пневматическим приводом (ЗИС).



Фиг. 191. Участок линии сборки кабины грузового автомобиля.

водит к большому падению напряжений в кабеле (до $10-15 \text{ в}$) и большим потерям энергии в нем, но позволяет получить кабель

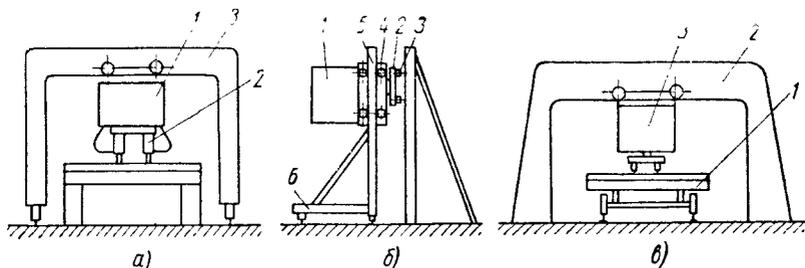
относительно малого сечения. Этим обеспечиваются легкость и гибкость кабеля, необходимые для высокопроизводительной работы подвесной машины. В отдельных случаях с помощью легких подвесных клещей удается сваривать до 60 и более точек в минуту. Длина кабеля, определяющая радиус действия клещей, обычно не превышает 2—2,5 м. При этом вторичное напряжение сварочного трансформатора на последней, наивысшей ступени достигает 20 в при его регулировании 16 ступенями (от 5 в).

Легкие клещи с полезным вылетом до 150 мм (фиг. 190), развивающие на электродах усилие до 250 кг, весят без кабелей и шлангов 10—15 кг. В массовом производстве обычно один сборочный кондуктор оснащается несколькими подвесными машинами, снабженными специализированными клещами, позволяющими наиболее удобно сваривать различные точки собираемого узла. Некоторое предствление об оснащении такого производства сварочным оборудованием дает фотография небольшого участка поточной линии сборки и сварки кабины автомобиля (фиг. 191) на одном из крупных отечественных автомобильных заводов. Для экономии полезной площади все шкафы 1 с включающими устройствами расположены на антресолях. Трансформаторы 2 установлены над трубчатым каркасом кондуктора 3, в котором устанавливается свариваемый кузов кабины 4, перемещаемый с одного рабочего места потока на другое по рельсовому пути 5. Помимо клещей с пневмогидравлическим приводом, на автомобильных заводах широко применяются более простые и легкие клещи с пневматическим приводом (см. фиг. 190), пригодные для сварки стали толщиной 1—1,5 мм. В этом случае толщина свариваемых деталей ограничивается величиной развиваемого клещами усилия на электродах.

§ 7. ДВУХ- И МНОГОТОЧЕЧНЫЕ МАШИНЫ

Машины этих типов особенно эффективны в массовом производстве. Двухточечная сварка производится на медной подкладке (см. фиг. 99, б) или с изолированным медным шунтом (см. фиг. 99, в). При большом расстоянии *a* и отсутствии дополнительного шунта много энергии бесполезно расходуется на нагрев нижнего листа в промежутке между привариваемыми угольниками. Односторонняя двухточечная сварка главным образом применяется при изготовлении узлов больших размеров. Установки для такой сварки строятся по одной из следующих схем: а) свариваемое изделие (например, боковина цельнометаллического вагона, состоящая из листа и привариваемых к нему штампованных элементов) укладывается на медный лист неподвижного стеллажа (фиг. 192, а); трансформатор 1 с двумя головками 2 устанавливается на портале 3 и может перемещаться относительно изделия как в продольном, так и в поперечном направлении; в некоторых установках возможен также поворот траверсы с головками на 90° относительно вертикальной оси; б) изделие располагается в вертикальной плоскости и прижимается во время сварки к жесткому неподвижному кондуктору (фиг. 192, б); сварочный трансформатор 1 и траверса 2 с головками 3 крепятся к каретке 4, пере-

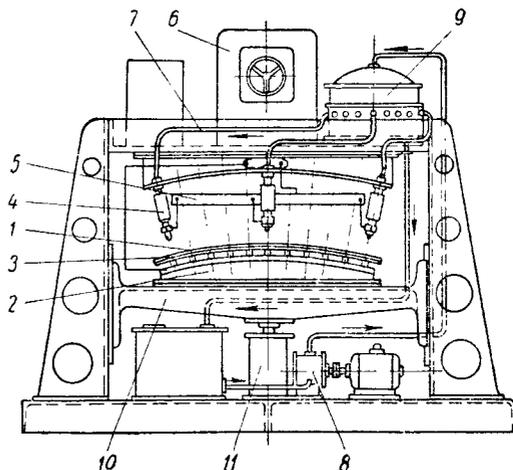
мещающейся в вертикальном направлении по направляющей 5 велосипедного крана 6; кран может перемещаться вдоль свариваемого изделия; преимущество такой установки по сравнению с предыдущим типом —



Фиг. 192. Принципиальные схемы машины для двухточечной сварки.

компактность и уменьшение необходимой площади цеха; в) изделие размещается на подвижном кондукторе 1 (фиг. 192, в) под неподвижным порталом 2, вдоль которого движется каретка 3 с трансформатором и сварочными головками; преимущества этого типа установки — облегчение организации потока и упрощение конструкции портала, ее недостатки — усложнение кондуктора и увеличение площади цеха, занимаемой сварочной установкой.

Расстояние между одновременно свариваемыми точками в двухточечных машинах обычно регулируется. Для получения качественной сварки это расстояние не должно быть меньше 40—50 мм и каждый электрод должен иметь самостоятельное нажимное устройство, гарантирующее равенство усилий, развиваемых при сварке каждым из двух электродов. Кроме того, необходимо, чтобы при сварке каждой пары точек сохранились по возможности одинаковые размеры сварочного контура.



Фиг. 193. Однотрансформаторная многоточечная машина с последовательным зажатием электродов.

Наибольшая производительность процесса осуществляется при переходе к многоточечным машинам. Принципиальные схемы многоточечной сварки были рассмотрены в гл. V (см. фиг. 100). Фотография современной многоточечной машины приведена на фиг. 3. Конструктивная схема однотрансформаторной многоточечной машины с поочередным зажатием электродов дана на фиг. 193. Свариваемое изделие 1

укладывается на шину 2, снабженную в местах сварки вставными электродами 3. Сварочные головки 4 (по типу, показанному на фиг. 173, б) укреплены на общей верхней шине 5, соединенной с трансформатором 6, установленным на станине 7. Насос высокого давления 8 подает масло через распределитель 9 в головки 4. Для облегчения установки изделия в машине стол 10 может подниматься пневматическим устройством 11. Описанная машина обладает двумя существенными недостатками: сложна гидравлическая система и возможны значительные деформации изделия во время сварки. Эти недостатки устраняются в машинах, осуществляющих одновременное зажатие изделия всеми электродами при поочередном присоединении каждой пары электродов к сварочному трансформатору. Значительные преимущества имеет также многоточечная машина с индивидуальными трансформаторами, обеспечивающая возможность равномерной загрузки трехфазной сети и одновременной сварки более чем двух точек при самостоятельном регулировании режима сварки для каждой пары точек. Размеры и мощность индивидуальных трансформаторов относительно малы, так как эти трансформаторы размещаются близко к месту сварки (уменьшаются размеры сварочного контура и его сопротивление) и работают с очень низкой продолжительностью включения ($PB^0/0$). Схемы многоточечных машин приведены на фиг. 100.

§ 8. ТОЧЕЧНЫЕ МАШИНЫ ДЛЯ СВАРКИ ЗАПАСЕННОЙ ЭНЕРГИЕЙ

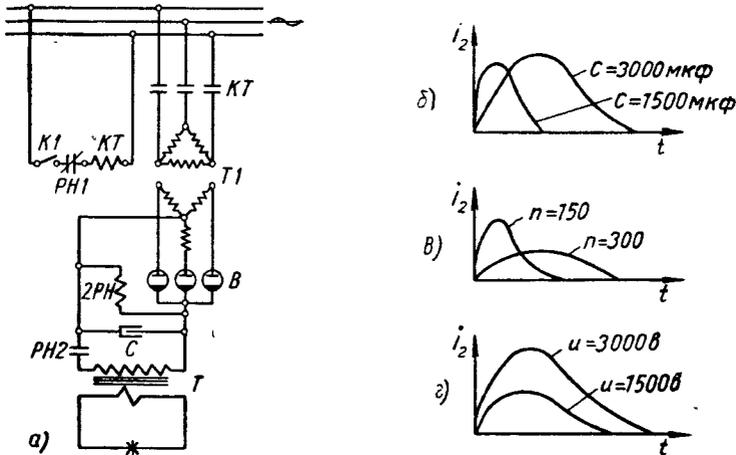
Во многих случаях точечная сварка должна выполняться с минимальной длительностью включения сварочного тока, но при очень больших его значениях. Это, в частности, имеет место при сварке легких сплавов. При таком процессе используется очень большая мощность, но расходуется незначительное количество электроэнергии. Например, при точечной сварке деталей из алюминиевых сплавов толщиной до 2 мм требуется мощность до 350 *кв*а при длительности включения сварочного тока 0,2 сек.

Кратковременное включение однофазного сварочного трансформатора большой мощности неблагоприятно сказывается на работе заводской электросети, вызывая при включении резкие колебания напряжения и значительный перекос фаз. Кроме того, при совпадении моментов включения двух или более точечных машин большой мощности нарушается режим сварки каждой из них, качество сварных точек оказывается неустойчивым. Для устранения этих неудобств созданы сварочные машины, в которых энергия, относительно медленно забираемая из сети, накапливается в электрическом или магнитном поле, а затем со значительной скоростью расходуется во вторичной цепи машины для полезного нагрева свариваемых деталей. Питание этих машин, как правило, осуществляется трехфазным током через специальные выпрямительные установки.

Машины для сварки запасенной энергией, помимо энергетических преимуществ, обладают очень существенным технологическим достоинством — при сварке каждой точки расходуется достаточно точно контролируемое количество энергии в течение практически постоянного

интервала времени, что обеспечивает очень стабильное качество соединений. В настоящее время широко применяются при сварке легких сплавов запасенной энергией два типа машин: конденсаторные, в которых энергия накапливается в батарее конденсаторов, т. е. в электрическом поле, и индукционные, в которых энергия накапливается в магнитном поле сварочного трансформатора.

Принципиальная схема конденсаторной точечной машины приведена на фиг. 194, а. При замыкании кнопки $K1$ включается повысительный



Фиг. 194. Принципиальная электрическая схема (а) и кривые сварочного тока (б—г) конденсаторной машины.

трансформатор $T1$ через линейный контактор KT . Этот трансформатор соединен с выпрямителем B . Выпрямленный ток заряжает батарею конденсаторов C . Зарядка конденсаторов продолжается до тех пор, пока на их обкладках не создается заданная разность потенциалов (заданное напряжение), при которой срабатывает реле напряжения PH , отключающее трансформатор $T1$; дальнейшая зарядка конденсаторов приостанавливается. Энергия электрического поля конденсатора в ватт-сек (энергия, запасенная в конденсаторе) при этом равна

$$W_c = \frac{CU^2}{2}, \quad (80)$$

где C — емкость конденсаторов в фарадах (ϕ) и U — напряжение на его обкладках в в.

При срабатывании реле PH автоматически замыкаются контакты $PH2$. В результате этого конденсатор разряжается на первичную обмотку сварочного трансформатора T , в которой при этом протекает изменяющийся по величине ток, создающий переменный магнитный поток в сердечнике трансформатора. Вначале ток от нуля быстро нарастает до максимального значения, а затем, по мере разрядки конденсатора, относительно медленно понижается. Вследствие этого во вторичной

обмотке трансформатора T индуцируется кратковременный импульс сварочного тока (фиг. 194, б).

Как следует из формулы (80), количество энергии, запасенной в конденсаторе, пропорционально емкости и квадрату напряжения. Для того чтобы избежать чрезмерных размеров батареи дорогих конденсаторов, приходится применять высокое напряжение, достигающее 3000—4000 в. При этом емкость конденсаторов, достаточная для накопления энергии 15—20 квт·сек (это количество энергии необходимо для точечной сварки деталей из легких сплавов толщиной до 2—2,5 мм), достигает 3000—4000 мкф. Применение в конденсаторных машинах высокого напряжения — один из существенных недостатков оборудования этого типа, так как это напряжение при неисправности машины и ненадежном заземлении безусловно опасно для обслуживающего персонала.

Регулирование характера кривой сварочного тока в конденсаторной машине (фиг. 194, б — г) может осуществляться тремя способами: изменением емкости конденсаторов (часть конденсаторов отключается), изменением коэффициента трансформации сварочного трансформатора (с помощью обычного секционного переключателя) и изменением напряжения на обкладках конденсаторов (изменением настройки реле напряжения RH). При первом и последнем способах изменения формы кривой сварочного тока одновременно регулируется и количество запасенной энергии. Как видно из приведенных кривых, для увеличения длительности сварки необходимо повысить коэффициент трансформации. При уменьшении э. д. с. вторичной обмотки сварочного трансформатора в сварочной цепи протекает меньший ток, а следовательно, время расходования запасенной в конденсаторах энергии растет. Увеличение емкости конденсаторов и напряжения на их обкладках различно влияет на характер кривой сварочного тока: увеличение емкости приводит к затягиванию разряда при почти неизменном значении максимального тока, увеличение напряжения, наоборот, резко повышает максимальный ток.

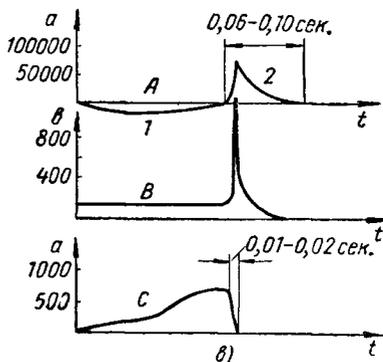
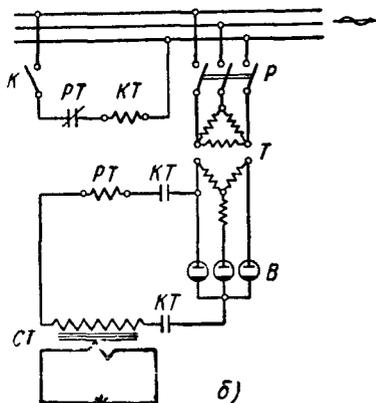
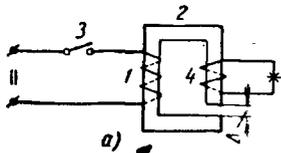
Обычно коэффициент трансформации конденсаторных машин лежит в пределах 150—600 и регулируется 2—4 ступенями. Длительность сварочного импульса в зависимости от настройки машины изменяется в пределах 0,02—0,16 сек. Длительность зарядки конденсаторов перед сваркой каждой точки не превышает 1 сек., а потребляемая при этом из сети мощность составляет 50—75 ква. Эта мощность в 4—5 раз меньше мощности машин переменного тока, необходимой для сварки деталей из алюминиевых сплавов такой же толщины. Производительность конденсаторной машины в зависимости от толщины свариваемых деталей, определяющей необходимое для сварки количество энергии и, как следствие, — время ее накопления, достигает 25—100 точек в минуту.

В механической части конденсаторные машины не отличаются по конструкции от нормальных точечных машин переменного тока. Обычно они имеют пневматический привод механизма сжатия электродов. В связи с очень большой скоростью сварки на конденсаторных машинах подвижная головка с верхним электродом должна иметь минималь-

ный вес и инерцию с тем, чтобы электрод успевал следовать за деформируемым при нагреве металлом свариваемых деталей. Для уменьшения трения в подвижной системе головка иногда переключается на роликах.

Преимущества конденсаторных машин — малая мощность, потребляемая из сети, равномерная нагрузка фаз, высокий коэффициент мощности; возможность удобного регулирования длительности процесса и формы кривой сварочного тока; относительно малые потери энергии, запасенной в конденсаторах, вне сварочной цепи. Недостатки конденсаторных машин — высокое напряжение в первичной цепи сварочного трансформатора и значительная стоимость высоковольтных конденсаторов.

Принцип действия индукционной машины поясняется схемой на фиг. 195, а. Если присоединить катушку 1 с железным сердечником 2



Фиг. 195. Схемы и кривые напряжения и тока индукционных машин.

к источнику постоянного тока и нажать ключ 3, то через катушку потечет ток, величина которого будет постепенно нарастать от нуля до своего максимального установившегося значения. При этом в сердечнике создается магнитное поле. При размещении на сердечнике второй катушки 4, концы которой замкнуты через свариваемые детали, в момент размыкания ключом 3 цепи катушки 1 энергия, ранее израсходованная на создание магнитного поля в сердечнике, возвращается в систему, так как при размыкании цепи магнитное поле исчезает и его энергия должна вновь стать равной нулю. Основная часть энергии магнитного поля расходуется в цепи катушки 4, хотя некоторое ее количество обязательно бесполезно затрачивается в первичной катушке 1 в момент разрыва ее цепи. Чем быстрее разрывается эта цепь, тем относительно меньше потери в ней энергии.

Сущность процесса заключается в том, что при отключении катушки 1 от сети постепенно исчезающий в сердечнике магнитный поток

индуктирует в обеих катушках э. д. с., которая создает в обеих цепях токи.

Энергия магнитного поля равна

$$W_{\text{м}} = \frac{LI^2}{2}, \quad (81)$$

где I — ток в катушке I в момент, предшествующий разрыву ее цепи, в a ;

L — индуктивность катушки I в генри ($гн$).

Энергия магнитного поля в обычном сердечнике относительно мала — она не превышает $0,0018 \text{ вт-сек/см}^3$. Для того чтобы в таком сердечнике накопить 20 квт-сек , потребовался бы сердечник весом более $80\,000 \text{ кг}$. Удельная энергия, накапливаемая в магнитном поле, может быть увеличена во много раз при введении воздушного зазора в магнитную цепь сердечника. Наибольшая удельная мощность магнитного поля (порядка $0,045 \text{ вт-сек/см}^3$) достигается при зазоре Δ шириной около 3% от общей длины магнитопровода. Учитывая потери энергии в первичную цепь при ее разрыве, энергия, которая может быть отдана магнитным полем стального сердечника весом 3000 кг в сварочную цепь, составляет около 14 квт-сек . Потери в первичную цепь не бывают меньше 20% общей энергии системы.

Принципиальная электрическая схема индукционной машины показана на фиг. 195, б. При включении рубильника P подается напряжение на первичные обмотки трансформатора T , питающего выпрямительную установку B . При замыкании ключа K срабатывает контактор KT , и выпрямленный ток начинает обтекать первичную обмотку сварочного трансформатора CT , в магнитной цепи которого имеется воздушный зазор, необходимый для увеличения удельной мощности, накапливаемой в магнитном поле. Ток в первичной обмотке сварочного трансформатора и магнитный поток в его сердечнике при этом нарастают постепенно (кривая C , фиг. 195, в), в связи с чем в замкнутой сварочной цепи индуктируется незначительный ток I (кривая A , фиг. 195, в). По достижении первичным током заданной величины, которая, как следует из формулы (81), определяет при неизменной индуктивности системы количество запасенной в магнитном поле энергии, срабатывает реле тока PT (фиг. 195, б), быстро разрывающее цепь первичной обмотки сварочного трансформатора. При этом в сварочной цепи возникает кратковременный импульс тока 2 (кривая A , фиг. 195, в).

Обычно напряжение в первичной цепи сварочного трансформатора индукционной машины не превышает $150\text{—}160 \text{ в}$. Однако в момент разрыва этой цепи в ней индуктируется значительно более высокое напряжение (фиг. 195, в, кривая B). Это напряжение может превышать 1000 в , причем оно тем выше, чем быстрее разрывается первичная цепь машины. При этом необходимо отметить, что с увеличением скорости разрыва первичной цепи, как указывалось выше, уменьшаются потери энергии в этой цепи и растёт к. п. д. установки.

Важнейшим узлом индукционной машины является устройство для быстрого и бездугового разрыва первичной цепи. В более старых кон-

струкциях индукционных машин разрыв первичной цепи осуществлялся серией контакторов, контакты которых соединялись последовательно и шунтировались сопротивлениями. Контактры регулировались так, чтобы их отключение происходило с небольшим интервалом времени порядка 0,002—0,003 сек., а общая длительность срабатывания всех контакторов не превышала 0,01—0,02 сек. При размыкании каждого контактора увеличивалось сопротивление разрываемой цепи из-за введения в эту цепь сопротивления, шунтирующего очередную пару размыкаемых контактов. Наконец, при размыкании последнего контактора сопротивление цепи было настолько велико, что протекающий в ней ток разрывался без заметного дугового разряда. Недостаток описанной системы — возможность расстройств работы последовательно включенных контакторов. В более новых индукционных машинах разрыв первичной цепи достигается быстродействующим механическим выключателем, снабженным специальным устройством для выдувания электрической дуги в момент разрыва цепи.

Индукционные машины обладают всеми энергетическими преимуществами конденсаторных машин (малое потребление мощности из сети, равномерная нагрузка трех фаз, высокий коэффициент мощности). Преимущество этих машин по сравнению с конденсаторными машинами — более низкое напряжение в первичной цепи сварочного трансформатора и отсутствие высоковольтных конденсаторов большой емкости; недостатки — громоздкость трансформатора и зависимость результатов сварки от состояния и регулировки выключающего устройства в первичной цепи машины. Индукционные машины находят большее промышленное применение, чем конденсаторные. Производится серийный выпуск индукционных машин типа МТПИМ-200-3.

Помимо конденсаторных и индукционных машин, разработаны также машины, в которых необходимая для сварки энергия запасается во вращающемся маховике. Машины этого типа представляют собой генератор переменного тока, сидящий на одном валу с электродвигателем и тяжелым маховиком. Генератор питает сварочный трансформатор. В интервале между сваркой число оборотов всей системы поднимается до номинального, а в момент включения сварочного тока резкому торможению системы препятствует маховик, отдающий запасенную в нем кинетическую энергию и поддерживающий достаточно высокое число оборотов генератора. Мощность, отдаваемая машиной такой системы во время сварки, может превышать потребляемую ею мощность в интервале между сваркой в 4--5 раз. Машины этого типа находятся в стадии освоения.

ГЛАВА XII

МАШИНЫ ДЛЯ РОЛИКОВОЙ СВАРКИ

§ 1. КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ УЗЛЫ

Роликовые машины во многом сходны с точечными; их основное отличие — замена неподвижных во время сварки электродов точечной машины вращающимися дисками — роликами. Ролики при своем вращении одновременно сжимают свариваемые детали, подводят к ним сварочный ток и перемещают детали с заданной скоростью в направлении сварки. При этом один или оба ролика имеют принудительное вращение от специального привода.

Как было показано в гл. VII, в большинстве случаев целесообразна роликовая сварка с прерывистым включением сварочного тока. Этим обеспечивается возможность применения в сварочной цепи значительных токов, необходимых для получения надежного провара, без недопустимого перегрева поверхности свариваемых деталей и без чрезмерного износа роликов. Необходимое чередование импульсов сварочного тока и пауз между ними производится специальным электрическим устройством — прерывателем (см. § 6 гл. XIII).

Роликовые машины классифицируются:

1. По направлению перемещения свариваемых деталей: а) *машины для сварки продольных швов* (направление перемещения деталей совпадает с плоскостью сварочного контура машины); б) *машины для сварки поперечных швов* (направление перемещения деталей перпендикулярно плоскости сварочного контура — см. фиг. 2 и 200); в) *универсальные машины*, допускающие при незначительной переналадке как сварку продольных, так и сварку поперечных швов (см. фиг. 199); г) *машины для сварки круговых швов фланцев* (см. фиг. 202); д) *трубосварочные машины* (см. фиг. 203).

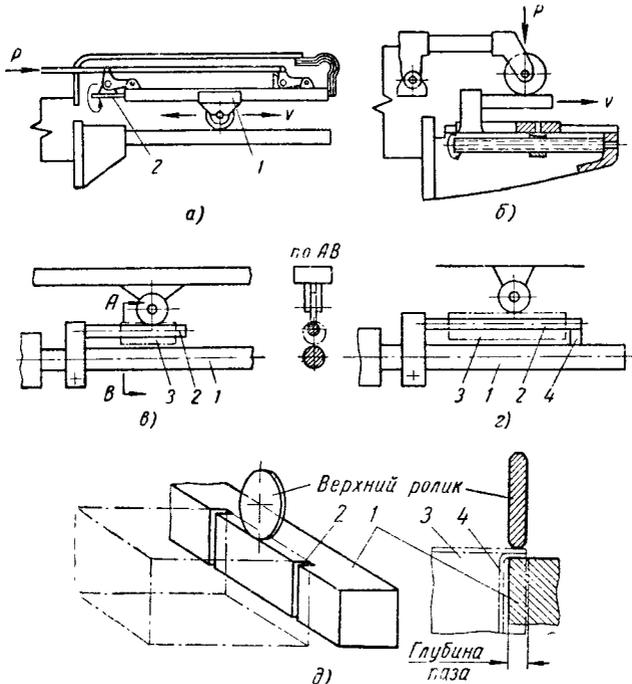
2. По размещению токоподводящих элементов: а) *машины для двухсторонней сварки* (преобладающий тип машин); б) *машины для односторонней сварки*.

3. По способу перемещения свариваемых деталей: а) *двухроликовые машины* с принудительным вращением одного или обоих роликов; б) *однороликовые машины* с неподвижным нижним плечом и поступательно-вращательным движением ролика (фиг. 196, а), или машины с неприводным роликом, вращающимся вокруг неподвижной оси, и плечом, имеющим продольное перемещение (фиг. 196, б).

4. По характеру движения свариваемых деталей: а) *машины с непрерывным движением деталей* во время их сварки; б) *машины с ша-*

говой подачей свариваемых деталей (в момент включения импульса сварочного тока движение деталей приостанавливается и возобновляется в интервалах между этими импульсами).

5. По приводу механизма сжатия свариваемых деталей: а) с педальным приводом; б) с электрическим приводом; в) с пневматическим приводом.



Фиг. 196. Принцип действия и схемы использования однороликовых машин.

6. По системе включения сварочного тока: а) с непрерывным включением тока (так называемые роликовые машины для непрерывной сварки); б) с прерывистым включением тока; в) с модулированием сварочного тока (в этих машинах сварочный ток периодически значительно уменьшается, но полностью не отключается).

7) По способу монтажа: а) стационарные; б) передвижные.

§ 2. КОНСТРУКЦИЯ ОСНОВНЫХ УЗЛОВ

Наибольшее распространение в промышленности получили универсальные или неуниверсальные (предназначенные для сварки только продольных или только поперечных швов) двухроликовые машины с непрерывной подачей свариваемых деталей, прерывистым включением сварочного тока и электрическим или (в новейших машинах) пневматическим приводом механизма сжатия свариваемых деталей. Машины

с шаговой подачей относительно сложны кинематически. Их применение при наличии надежно действующих прерывателей для роликовых машин с непрерывной подачей свариваемых деталей не оправдано (машины этого типа в СССР не выпускаются).

Однороликовые машины значительно расширяют возможность применения роликовой сварки. В частности, на машинах этого типа осуществима сварка внахлестку продольного шва трубок малого диаметра (20—30 мм). Для этого на неподвижном или подвижном плече 1 (фиг. 196, в) укрепляется медная оправка 2, на которую надевается свариваемое изделие 3. При малой длине оправка укрепляется консольно, при большой длине под ее свободный конец после надевания изделия вводится съемная опора 4 (фиг. 196, г). Однороликовые машины позволяют также сваривать угловые швы изделий прямоугольной формы. Для этой цели может быть применена прямоугольная оправка 1 (фиг. 196, д), в которой предусматриваются специальные пазы 2. При сварке корпуса 3 с прямоугольным доньшком 4 боковые кромки изделия входят в эти пазы, обеспечивая размещение свариваемого шва на оправке под серединой верхнего ролика машины. Глубина паза должна несколько превышать глубину отбортовки доньшка.

Станина и привод механизма сжатия роликовой машины мало отличаются от соответствующих узлов точечных машин. Как указывалось выше, в роликовых машинах применяются педальный привод этого механизма (устаревшая конструкция, не рациональная из-за значительной утомляемости сварщика, вынужденного длительное время нажимать на педаль), электропривод (усилие сжатия деталей создается кулачком и регулируется пружиной) и наиболее удобный пневматический привод. В современных серийных роликовых машинах усилие сжатия на роликах достигает 800 кг.

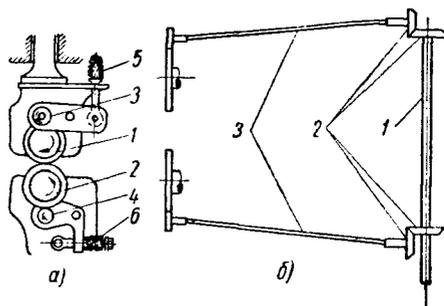
Это усилие достаточно для удовлетворительной сварки листов мягкой малоуглеродистой стали толщиной до 2 мм (каждого). При большей толщине свариваемых деталей быстро растет необходимая при сварке мощность и резко увеличивается требуемое для сжатия деталей усилие. При наличии хорошо разработанных методов автоматической электродуговой сварки стали толщиной выше 2 мм роликовая сварка такой стали нерентабельна и в промышленности применяется редко.

Основной механизм роликовой машины — привод вращения сварочных роликов. При сварке продольных швов изделие, как правило, имеет поступательное движение, при котором относительно легко добиться равномерной его скорости без проскальзывания между роликами. В связи с этим при продольной сварке обычно достаточно иметь принудительное вращение только одного ролика; при этом второй (холостой) ролик приводится во вращение трением между ним и движущимися деталями.

При сварке поперечных швов изделие может иметь поступательное или вращательное движение. При повороте тяжелых изделий во время сварки часто возникают значительные силы инерции, ведущие к проскальзыванию деталей между роликами. Следствием такого проскальзывания может быть прожог. Для уменьшения опасности проскальзывания

в машинах для сварки поперечных швов желателен привод обоих роликов.

При принудительном вращении обоих роликов должно быть обеспечено равенство линейных скоростей на их рабочих поверхностях. При неодинаковых скоростях неизбежно проскальзывание одного из роликов, ведущее к усиленному его износу. Равенство линейных скоростей роликов может быть обеспечено приводом (фиг. 197, а), в котором медные ролики 1 и 2 (или ролики из какого-либо медного сплава повышенной по сравнению с медью твердостью) приводятся во вращение прижатыми к ним калеными стальными шарошками 3 и 4, имеющими для увеличения трения накатанную поверхность. Сила прижатия шарошек к роликам регулируется пружинами 5 и 6. Шарошки вращаются валом 1 (фиг. 197, б) через конические шестерни 2 и карданные валики 3. Обешарошки, таким образом, вращаются с равными угловыми скоростями. Так как они имеют одинаковый диаметр, а их износ ничтожен, линейные скорости на поверхности шарошек всегда равны и не зависят от диаметра рабочей поверхности роликов, изменяющегося из-за их износа.



Фиг. 197. Привод роликов шарошками.

В современных роликовых машинах применяется плавное регулирование скорости сварки, т. е. окружной скорости роликов. Для этой цели используются передачи с бесступенчатым регулированием. Обычно линейная скорость роликовой сварки лежит в пределах $0,6-3,0$ м/мин.

Стальные накатанные шарошки, вращая ролики, одновременно зачищают их рабочую поверхность, непрерывно снимая с нее маленькую стружку. Такая зачистка особенно необходима при сварке стали с покрытиями (цинком, свинцом и др.), так как частицы металла покрытия, прилипая к рабочей поверхности роликов, ведут к повышению сопротивления в контакте между роликом и деталью, вызывая подгорание их поверхности. Шарошки размещаются так, чтобы частицы меди, снимаемые с роликов, падали на свариваемые детали со стороны уже сваренного шва. Неудобство привода шарошками — его значительные размеры, затрудняющие сварку внутри изделий малого диаметра.

В выпускаемых в настоящее время серийных роликовых машинах, за исключением машин типа МШПБ, предназначенных для сварки стали с защитным покрытием, только один ролик приводной: нижний в машинах для сварки поперечных швов (см. фиг. 200) и верхний в машинах для сварки продольных швов. Это значительно упрощает кинематическую систему машины и дает возможность применить простую жесткую связь между приводом и валом ролика.

Привод вращения роликов включается в начале рабочей смены и остается включенным на все время работы машины. Перемещение

деталей начинается автоматически в момент их зажатия, сопровождаемого включением сварочного тока. В однороликовых машинах (см. фиг. 196, а) ролик, имеющий поступательно-вращательное движение, укрепляется в каретке 1, перемещаемой ходовым винтом 2.

Сварочные ролики — сравнительно быстро изнашивающийся инструмент роликовой машины. От срока службы роликов в большой степени зависит рентабельность роликовой сварки. Стойкость роликов определяется: а) их материалом; б) размерами и формой роликов и в) интенсивностью охлаждения. Стойкость роликов зависит также от свойств свариваемого материала и от режима сварки.

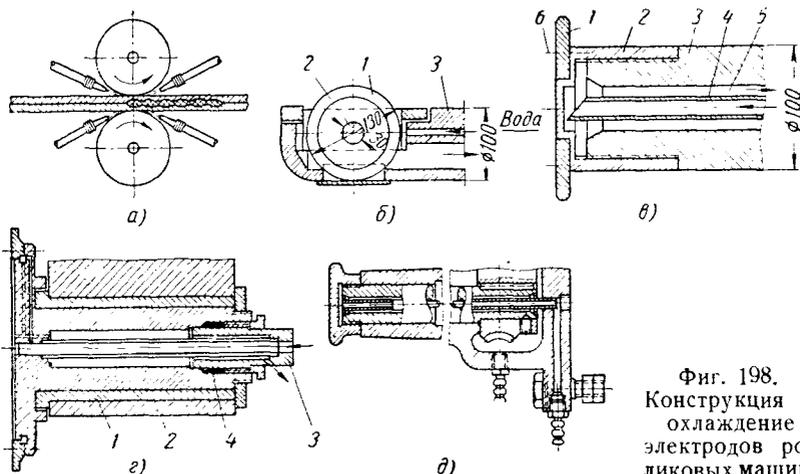
Ролики изготавливаются из твердой меди или из специальных электродных сплавов повышенной твердости (кадмиевой бронзы, сплава ЭВ, сплава МЦ4, см. § 4 гл. XI). При сварке малоуглеродистой стали электропроводность роликов не должна быть ниже 75—80% электропроводности меди; при сварке нержавеющей и жаропрочных сталей и сплавов могут использоваться электродные сплавы с несколько пониженной электропроводностью (70—75%) при соответствующем повышении их твердости; при сварке алюминиевых сплавов возможно применение электродов с электропроводностью не ниже 85—90% (лучшие результаты дает в этом случае кадмиевая бронза).

Стойкость роликов повышается с увеличением их диаметра и ширины рабочей части b (см. фиг. 117, а), так как при этом одновременно уменьшается удельное давление в контакте между электродом и свариваемой деталью и улучшается отвод тепла от места его наиболее интенсивного выделения — контакта. Следует, однако, иметь в виду, что с увеличением ширины ролика должен быть увеличен ток, необходимый для качественной сварки. Ширина ролика определяется толщиной и свойствами свариваемого материала и обычно лежит в пределах 3—8 мм (иногда достигая 10 мм). Применяются два типа роликов: с цилиндрической и со сферической рабочей частью (см. фиг. 117, а и б). Первый тип проще в эксплуатации и является основным. Желательно, чтобы диаметр роликов был не меньше 150—200 мм. В тех случаях, когда одно из плеч машины (как правило, нижнее) вводится при сварке внутрь изделия малого размера, диаметр нижнего ролика может быть значительно меньше указанных выше пределов (ролики диаметром менее 65—70 мм применяются редко). При этом увеличивается скорость износа ролика.

Для роликов применяется как наружное, так и внутреннее охлаждение. При наружном охлаждении вода или специальная охлаждающая эмульсия, предупреждающая коррозию свариваемых стальных деталей, подается четырьмя трубками (фиг. 198, а) непосредственно в зону сварки. Наружное охлаждение очень эффективно. Его недостатки — необходимость больших сборников для стекающей воды (см. лоток на фиг. 200), возможность разбрызгивания воды и загрязнение в связи с этим рабочего места, а также необходимость в некотором увеличении потребляемой при сварке мощности из-за дополнительного расхода энергии при интенсивном охлаждении деталей в зоне сварки.

Наружное охлаждение нижнего ролика малого диаметра иногда осуществляется, как показано на фиг. 198, б. Ролик 1 вращается вхол-

стю с осью 2. При этом он все время оmyвается водой, протекающей в нижнем плече 3 машины. На фиг. 198 показано также несколько типовых конструкций сварочных роликов с внутренним охлаждением. Простейшее крепление ролика для сварки поперечных швов (фиг. 198, в) осуществляется шестью болтами 6. Ролик центрируется цилиндрическим выступом оправки, воспринимающим основные усилия, действующие на ролик во время сварки. Ролик 1 не имеет непосредственного водяного охлаждения; он охлаждается через тонкие стенки оправки 2, которая навинчивается на плечо 3. Вода поступает по трубке 4 и отводится по каналу 5. Для уменьшения расхода электродных



Фиг. 198.
Конструкция и охлаждение электродов роликовых машин.

сплавов при смене изношенных роликов иногда применяются ролики со сменными кольцами. Конструкция такого ролика с интенсивным охлаждением кольца дана на фиг. 198, з. Недостаток этой конструкции — трудность уплотнения кольца и утечка воды. Иногда сменное кольцо приваривается к основному ролику. В этом случае изношенный ролик обтачивается, а затем на него надевается и приваривается новое кольцо. Ролики малого диаметра иногда укрепляются на резьбе (фиг. 198, д).

Один из наиболее важных конструктивных узлов роликовой машины — токоподвод от неподвижного трансформатора к вращающемуся ролику. Этот токоподвод обязательно связан со скользящим контактом, через который протекает значительный сварочный ток (в отдельных случаях достигающий 40 000 а и выше). Обычно скользящий контакт в роликовых машинах объединяется с подшипниками, передающими усилие, развиваемое при сварке на роликах, корпусу (станине) машины. Для этой цели применяются подшипники скольжения и качения. При этом ролик может размещаться между двумя подшипниками или на консоли. При консольном размещении значительно упрощается смена изношенного ролика. В машинах для сварки поперечных швов применяется только консольное

крепление роликов; в машинах для сварки продольных швов встречаются оба типа крепления (нижний ролик малого диаметра обычно имеет промежуточное крепление, уменьшающее размеры этого узла, а верхний — консольное).

Разрез токоподводящего подшипника скольжения при консольном креплении ролика для сварки поперечных швов показан на фиг. 198, з. Ток подводится через длинный подшипник, снабженный твердой бронзовой втулкой 1. Корпус подшипника 2 соединяется медными шинами с трансформатором. Во втулке делается зазор в 0,2—0,3 мм, с тем чтобы при нагреве контакта во время сварки не было заедания подшипника. Подшипник смазывается смесью графита и масла. Эта смазка обладает электропроводностью и не нарушает электрического контакта. Вода подводится к вращающемуся ролику через неподвижную втулку 3, имеющую сальниковое уплотнение 4.

Токоподводящие подшипники качения представляют собой роликовые подшипники игольчатого типа (с роликами диаметром 6—8 мм). Ролики подшипника изготавливаются из твердой бронзы. Пространство между роликами заполняется густой смазкой указанного выше состава (графит с маслом). Известны случаи подвода тока дисками, вращающимися в ртутной ванне. Этим обеспечивается надежный токоподвод; однако возможность выделения паров ртути, опасных для здоровья, делает нежелательным применение ртутного контакта, тем более, что применяемые в настоящее время конструкции скользящего контакта вполне удовлетворительно работают в производственных условиях.

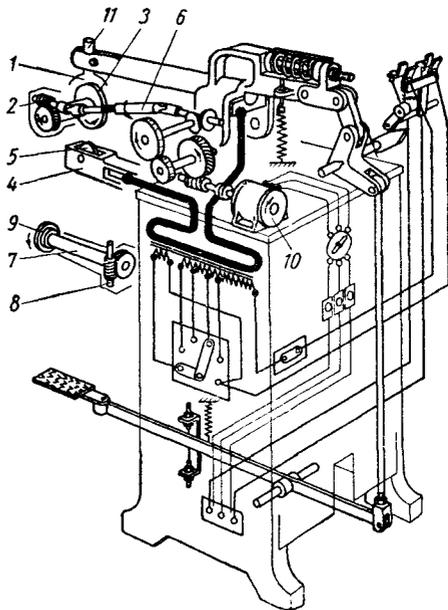
При сварке стали очень малой толщины (толщиной менее 0,2—0,3 мм) ничтожный перекосяк роликов приводит к дефектам сварки. В связи с этим целесообразно применение жесткого крепления медных роликов к стальному валу, вращающемуся в обычных шарикоподшипниках (с минимальными деформациями) с самостоятельным подводом тока через дополнительную разрезную втулку.

§ 3. ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СЕРИЙНЫХ МАШИН

Техническая характеристика серийных роликовых машин приведена в табл. 22. Все эти машины — двухроликового типа. Машина типа АШП-25 — универсальная. Она снабжается сменными узлами для переналадки на сварку как продольных, так и поперечных швов. Остальные машины — неуниверсальные. Они предназначены для сварки только продольных или только поперечных швов. Машины серии МШПБ специально спроектированы для сварки баков из стали с защитным покрытием. Их отличительная особенность — привод роликов стальными шарошками и размещение верхнего и нижнего роликов машины под углом, несколько меньшим 90°, к горизонтальной оси машины. Последнее облегчает доступ к сварке узких отбортованных соединений, применяемых в современных конструкциях баков (см. фиг. 114, а).

Электрокинематическая схема простейшей роликовой машины (АШП-25) малой мощности с педальным приводом показана на фиг. 199. Привод механизма сжатия деталей такой же, как в точечных машинах типа АТП

(см. гл. XI). При сварке продольного шва ведущим является верхний ролик 3, укрепленный в корпусе 1. Привод осуществляется электродвигателем 10, соединенным через карданный валик 6 с червячным редуктором 2. Нижний ролик 5 свободно вращается с осью 4. При сварке поперечного шва корпус 1 с роликом 3 после отсоединения карданного валика поворачивается вокруг оси 11 на 90°. Одновременно замещается нижнее плечо машины (устанавливается вращающееся плечо 7 с роликом 9 и червячным редуктором 8). При сварке поперечного шва приводной — только нижний ролик. Для его привода конец карданного валика 6 соединяется с валиком червячного редуктора 8. Машина не имеет специального прерывателя и может быть использована только для сварки малоответственных соединений на деталях из малоуглеродистой стали относительно небольшой толщины (0,75—1 мм). Машина МШМ-25 отличается от описанной машины АШП-25 применением электрического привода механизма сжатия деталей, аналогичного приводу точечных машин серии МТМ (см. фиг. 171 и 184). Кроме того, в отличие от АШП-25, в машине МШМ-25 при сварке продольных и поперечных швов приводным является верхний ролик.



Фиг. 199. Электрокинематическая схема роликовой машины АШП-25. (А. И. Ахун.)

Машины серий МШП и МШПБ-роликковые машины, предназначенные для сварки в массовом производстве ответственных соединений. Общий вид машины типа МШП показан на фиг. 200 (фотография машины этого типа была приведена на фиг. 2). Машины снабжаются надежно действующими прерывателями (см. гл. XIII), обеспечивающими синхронное включение сварочного тока импульсами заданной длительности при строго определенных паузах между ними. Машины имеют пневматический привод механизма сжатия свариваемых деталей. С этой целью на машине установлен двухкамерный пневматический цилиндр 1. Во время работы машины верхняя камера цилиндра всегда заполнена сжатым воздухом. При выпуске сжатого воздуха (более высокого давления) из нижней камеры цилиндра верхний ролик опускается, сжимая свариваемые детали. Управление пневматической системой осуществляется электропневматическим клапаном. Ход верхнего ролика машины достаточен для компенсации радиального износа каждого ролика на 30—40 мм. Машины серии МШП-150 отличаются от машин серии МШП-100 только мощностью установленного в них сварочного трансформатора. Все эти

Таблица 22

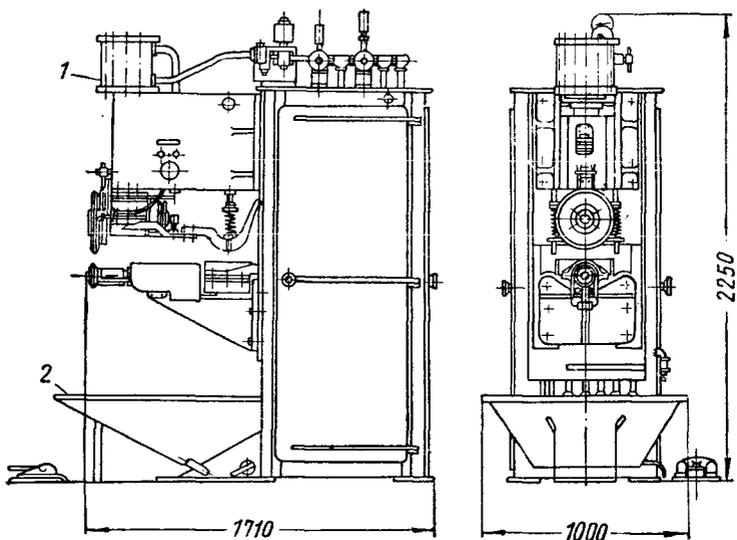
Характеристика серийных машин для роликовой сварки

Показатели	Единица измерения	Тип машины			
		АШП-25	МШМ-25	МШП-100-1 и 2 (МШП-150-1 и 2) ¹	МШП-100-3 и 4 (МШП-150-3 и 4) ¹
Первичное напряжение	<i>в</i>	380	220; 380	380	380
Номинальная мощность	<i>квт</i>	25	25	100(150)	100(150)
Номинальная продолжительность включения (ПВ)	%	50	50	50	50
Номинальный ток в первичной цепи	<i>а</i>	66	96; 65	263 (395)	263 (395)
Число ступеней регулирования трансформатора	шт.	8	8	8	8
Пределы регулирования вторичного напряжения холостого хода	<i>в</i>	2,2—4,5	1,96—3,6	3,5—6,2 (4,0—6,5)	3,5—6,2 (4,0—6,5)
Привод механизма сжатия	—	Педальный	Электрический	Пневматический	
Ход верхнего ролика	—	По дуге окружности		Вертикальный	
Максимальное усилие, развиваемое на электродах	<i>кг</i>	250	250	800	800
Полезный вылет (при сварке листов) ²	<i>мм</i>	400	400	800 для типов 1 и 3; 550 для типов 2 и 4	
Рабочий ход электродов	"	20	20	55	55
Тип включателя	—	Механический		Синхронный игноронный пре- риватель с электронным син- хронизатором	

Направление свариваемых швов	Продольное и поперечное Принудительное вращение верхнего ролика при сварке продольных швов и нижнего ролика при сварке поперечных швов 0,75—3,0	Продольное Принудительное вращение верхнего ролика; верхний холодной	Продольное Принудительное вращение верхнего ролика; нижний холодной
Характеристика привода подачи	0,86—3,43	0,8—4,4	0,6—3,2
Скорость сварки	М/мин	Ступенчатое	Главное
Регулирование скорости	—	~ 8000	~ 17 000 (~ 24 000)
Максимальный сварочный ток при номинальной мощности	а	1,0+1,0	1,5+1,5 (2+2)
Максимальная толщина свариваемых деталей из малоуглеродистой стали (скорость сварки минимальная)	мм	300	750 (1000)
Расход охлаждающей воды	л/час	0,07	0,55
Мощность электродвигателей	квт	Поставляется без прерывателя	Синхронный игнитроинный типа ПИШ-100-1
Тип прерывателя	—	1400	2250
Габариты: высота	мм	700	1000
ширина	”	1100	1710
глубина	”	700	2000
Вес	кг		

1 Машина МШПБ-150-1 сходна с машинной МШП-150-1, а машина МШПБ-150-2 сходна с машинной МШП 150-2.
2 При сварке обечеек полезный вылет зависит от их диаметра.

машины снабжены лотком 2, облегчающим применение наружного водяного охлаждения роликов при сварке. Необходимый для устойчивой работы пневматической системы машины запас воздуха находится в воздухохосборниках. Эти трубчатые воздухохосборники являются частью корпуса машины.



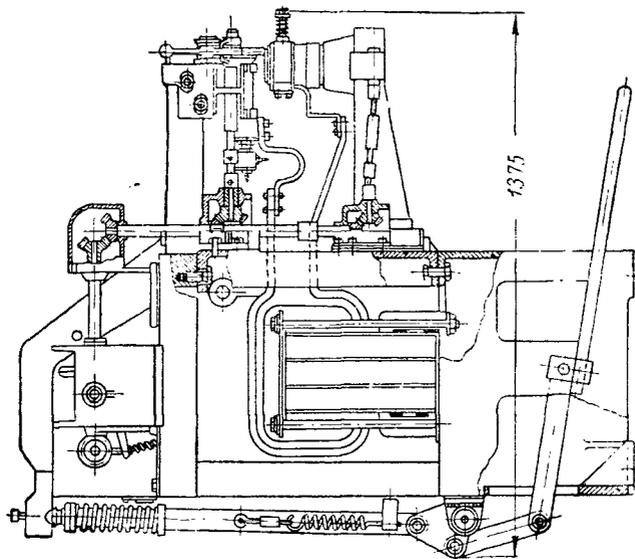
Фиг. 203. Общий вид роликовых машин типа МШП-100-1 и МШП-150-1.

§ 4. СПЕЦИАЛЬНЫЕ РОЛИКОВЫЕ МАШИНЫ

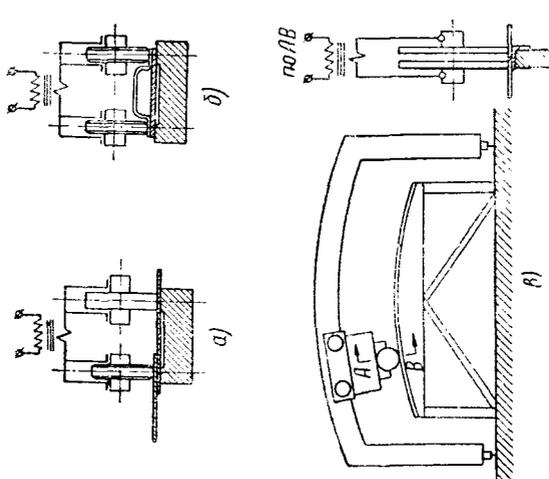
Помимо упомянутых в § 1 однораликовых машин, к машинам специальных типов могут быть отнесены следующие:

- а) стационарные машины для односторонней роликовой сварки одного (фиг. 201, а) или двух (фиг. 201, б) швов;
- б) порталные машины для односторонней роликовой сварки изделий большого размера, например, крыши вагона (фиг. 201, в);
- в) машины с взаимно перпендикулярным расположением роликов для сварки фланцев (фиг. 202);
- г) трубосварочные машины;
- д) машины для непрерывной сварки двухслойной стальной заготовки по способу Игнатьева.

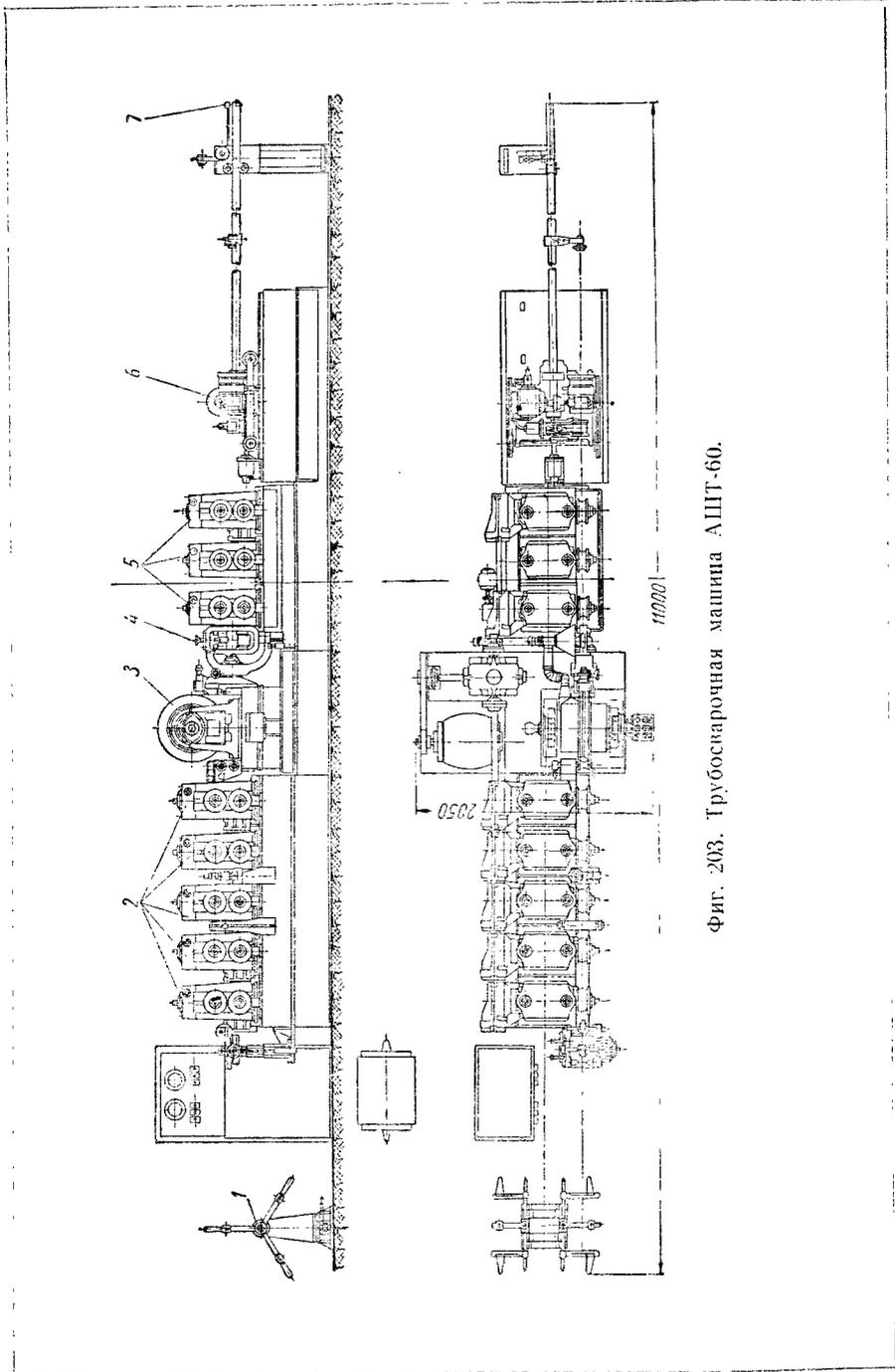
Из перечисленных специальных типов машин наибольшее промышленное значение в настоящее время имеют трубосварочные машины. Непрерывная сварка продольного шва трубы осуществляется по схеме, показанной на фиг. 15. Этим способом могут свариваться как трубы относительно малого диаметра (от 6 мм) при толщине стенки от 0,5 мм, так и трубы большого диаметра (известны случаи контактной сварки труб диаметром до 660 мм при толщине стенки до 20 мм). Контактная сварка труб диаметром от 14 до 150 мм получила наибольшее



Фиг. 202. Роликовая машина для сварки фланцев.



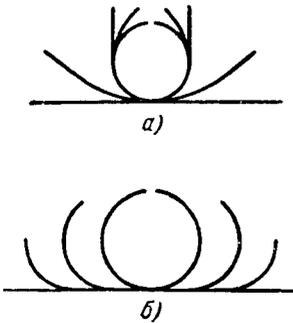
Фиг. 201. Схемы применения двухроликовой сварки.



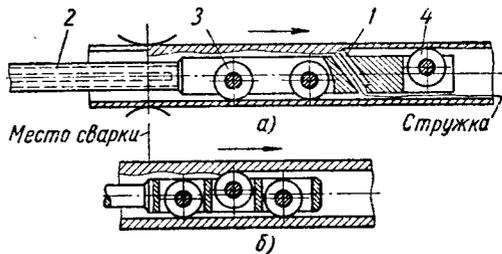
Фиг. 203. Грубосварочная машина АШТ-60.

распространение. Скорость сварки труб зависит от толщины стенки и мощности сварочной машины; она обычно лежит в пределах от 8 до 30 м/мин. При скорости свыше 15 м/мин ток промышленной частоты (50 гц) часто не обеспечивает плотности сварного шва из-за большого шага отдельных точек, в связи с чем приходится повышать частоту до 100—150 гц.

Первые отечественные трубосварочные машины типа АШТ-60 (фиг. 203) предназначались для непрерывной сварки труб диаметром от 14 до 55 мм при толщине стенки 0,8—2 мм. Наилучшие результаты дает сварка труб из малоуглеродистой и низколегированной стали. Контактная сварка продольных швов труб из аустенитных сталей пока не освоена.



Фиг. 204. Постепенная формовка трубной заготовки:
а — при трубах малого диаметра;
б — при трубах большого диаметра

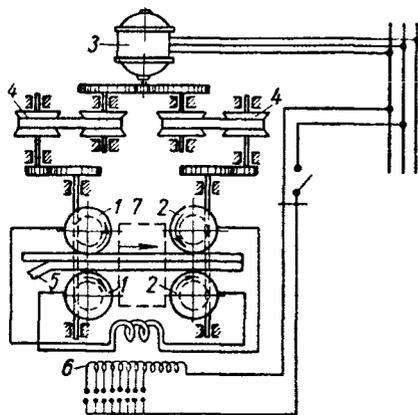


Фиг. 205. Приспособления для удаления графа и высаженного металла в свариваемой трубе:

а — путем срезывания; б — путем раскатки.

Калиброванная холоднокатанная стальная лента требуемого сечения непрерывно сматывается с катушки 1 и поступает через направляющее устройство в клетки 2 с формовочными роликами. По мере прохождения ленты через ролики из нее формируется круглая заготовка трубы с расположенным сверху зазором. Характер постепенной деформации ленты показан на фиг. 204, а (в машинах для сварки труб большого диаметра формование заготовки производится по схеме, показанной на фиг. 204, б). В средней части трубосварочной машины расположен вращающийся сварочный трансформатор 3 (см. фиг. 203), кольцевые электроды которого катятся по кромкам трубной заготовки в непосредственной близости к месту сварки. За трансформатором размещается приспособление 4 для срезывания наружного высаженного при сварке металла. Это приспособление представляет собой держатель с укрепленными в нем двумя последовательно расположенными резами. При протягивании сваренной трубы через это приспособление высаженный металл срезается почти ровень с поверхностью трубы. Высаженный металл внутри трубы остается или удаляется. При диаметре трубы более 50 мм высаженный металл в трубе срезается резами 1, укрепленными в полой штанге 2 с водяным охлаждением, положение которой фиксируется роликами 3 и 4, или закатывается специальными роликами (фиг. 205, а и б). Труба движется в направлении стрелки.

После удаления высаженного металла труба поступает в калибровочное устройство 5 трубосварочной машины (см. фиг. 203), состоящее из трех клеток с четырьмя роликами в каждой. Эти ролики калибруют трубу по диаметру и правят ее в вертикальной плоскости (труба, односторонне нагреваемая при сварке, стремится по выходе из-под сварочного трансформатора изогнуться передним концом вверх). Калибровка достигается всесторонним обжатием трубы в четырех роликах. Правка производится за счет некоторого вертикального смещения оси роликов средней клетки калибровочного устройства относительно оси его крайних клеток. По выходе из калибровочных роликов конец трубы про-



Фиг. 206. Схема машины для непрерывной сварки по методу Игнатъева.

ходит через отверстие летучих ножиц 6. Когда конец непрерывно движущейся трубы доходит до упора 7, открывается клапан пневматического прижима, и каретка с укрепленной на ней отрезной головкой ножицы начинает перемещаться вместе с трубой. При этом головка с резацами вращается вокруг трубы, отрезая от нее кусок требуемой длины.

Схема машины для непрерывной сварки ленты по способу Игнатъева приведена на фиг. 206. В машине имеются две пары медных роликов 1 и 2, вращающихся вокруг вертикальных осей. Ролики приводятся во вращение двигателем 3 через механизм 4 с регулируемым числом оборотов. Слева в машину подаются подлежащие сварке полосы 5 длиной 4—5 м. Один из роликов каждой пары (1 или 2) может перемещаться в горизонтальном направлении и прижимается к парному с ним ролику пружиной, обеспечивающей постоянное усилие зажатия свариваемых заготовок. Ролики 1 и 2 присоединяются к сварочному трансформатору 6. Таким образом, свариваемые заготовки на участке между роликами замыкают сварочную цепь трансформатора и при включении тока интенсивно нагреваются. Температура заготовок постепенно растет от холодных роликов 1 к горячим роликам 2. Так как сварка по способу Игнатъева происходит без расплавления металла, то качественное соединение может быть получено только при совершенно чистой поверхности заготовок. Поэтому недопустимо окисление заготовок при нагреве. Для защиты от окисления между токоподводящими роликами располагается камера 7, в которую нагреваемые полосы входят и из которой они выходят через небольшие отверстия. В камере сжигается газ, создающий в ней защитную атмосферу.

ГЛАВА XIII

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТОЧЕЧНОЙ И РОЛИКОВОЙ СВАРКИ

§ 1. ОСНОВНЫЕ СПОСОБЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ

Главная задача автоматизации точечной сварки — получение сварных точек заданной прочности при высокой производительности процесса. Как было показано в гл. V, сварные точки обладают равной прочностью при одинаковых размерах и структуре их центрального литого ядра. Размеры и структура ядра определяются условиями нагрева и охлаждения свариваемой точки и прежде всего распределением температуры в зоне сварки в момент окончания сварочного нагрева (температурным полем к концу сварки). Нагрев свариваемой точки зависит от очень многих параметров, основными из которых являются: длительность включения сварочного тока $t_{св}$, сила тока в сварочной цепи I_2 , сопротивление участка цепи между электродами R , усилие P , приложенное к электродам во время сварки, и диаметр контактной поверхности электрода d_s . Из них четыре параметра независимые, а сопротивление R определяется величинами P и d_s и состоянием поверхности свариваемых деталей. При точечной сварке деталей из заданного материала строго постоянной толщины и при неизменном качестве подготовки поверхности перед сваркой одинаковый нагрев каждой точки, а следовательно, и одинаковая прочность каждой точки будут обеспечены при постоянстве перечисленных выше пяти основных параметров процесса.

Следует отметить, что при постоянстве только трех параметров (длительности включения сварочного тока, силы тока и сопротивления) в соответствии с законом Ленца — Джоуля в зоне сварки выделяется неизменное количество тепла. Однако при непостоянстве остальных двух параметров процесса (P и d_s) распределение этого тепла в теле свариваемых деталей может изменяться, что приведет к изменению размеров расплавляемого при сварке ядра точки и к непостоянству ее прочности — качество сварки будет нестабильным. Такое положение наблюдается, например, при значительном увеличении диаметра контактной поверхности электродов, когда заданное количество тепла расходуется на нагрев возросшего объема металла.

В производственных условиях очень трудно достигнуть постоянства всех параметров точечной сварки. Длительность включения сварочного тока изменяется: а) из-за несовершенства включающих устройств и б) вследствие неточности регуляторов времени.

Сила тока изменяется в результате: а) колебаний напряжения в сети, питающей сварочную машину; б) изменения сопротивления свариваемых

деталей; в) изменения активного и индуктивного сопротивления сварочной цепи при введении в контур машины деталей из магнитной стали; г) шунтирования тока.

Сопротивление свариваемых деталей может изменяться вследствие: а) изменения усилия, непосредственно действующего в контакте между свариваемыми деталями (это усилие может изменяться даже при постоянном усилии, приложенном к электродам); б) изменения размера контактной поверхности электродов; в) неоднородного качества предварительной очистки свариваемых деталей.

Приложенное к электродам усилие может отклоняться от заданной величины из-за: а) нечеткой работы воздушных редукторов, не обеспечивающих постоянного давления в рабочем цилиндре механизма сжатия точечной машины; б) значительных и непостоянных по величине сил трения в подвижных элементах механизма сжатия (вследствие заедания в направляющих, плохой смазки, неудовлетворительной конструкции уплотняющих манжет и других причин); в) большой инерции движущихся частей (в машинах, работающих на особенно жестких режимах сварки, например индукционных машинах); г) изменения длины электродов (это существенно в машинах, в которых усилие передается электродам через пружину; при изменении длины электродов изменяется степень сжатия регулировочной пружины).

При точечной сварке автоматизирующее устройство должно обеспечить заданную длительность отдельных операций, входящих в полный цикл сварки, и их выполнение в строго определенной последовательности (см. фиг. 81, 102 и 103).

Устройство, включающее и регулирующее сварочный ток, называется п р е р ы в а т е л е м. Как было показано выше, обеспечение постоянной длительности сварочного нагрева еще не гарантирует неизменного качества сварных точек. Поэтому в некоторых современных прерывателях для автоматического управления процессом точечной сварки длительность нагрева непостоянна, а в зависимости от остальных параметров, влияющих на интенсивность нагрева свариваемой точки, автоматически регулируется.

По принципу действия прерыватели для точечной сварки могут быть разделены на две основные группы: а) прерыватели, управляющие процессом сварки по одному или нескольким параметрам, обеспечивающим с большей или меньшей степенью точности выделение при сварке каждой точки одинакового количества тепла; б) прерыватели, управляющие процессом по тем или иным физическим параметрам, непосредственно связанным с образованием сварной точки.

К первой группе относятся прерыватели, обеспечивающие постоянную длительность включения сварочного тока (прерыватели типа $t_{св} = \text{const}$), прерыватели, одновременно поддерживающие при сварке заданные значения $t_{св}$ и I_2 (прерыватели типа $t_{св} = \text{const}$ и $I = \text{const}$), прерыватели, ограничивающие количество электроэнергии, расходуемое при сварке каждой точки (прерыватели типа $EIt = \text{const}$).

Ко второй группе относятся прерыватели, выключающие сварочный ток при достижении в контакте электрод — деталь некоторой заданной

температуры (терморегулятор точечной сварки) или при расширении свариваемых деталей, зажатых между электродами, на заданную величину, связанную со степенью нагрева деталей (сварочный термометр).

Подавляющее большинство применяемых в настоящее время прерывателей не осуществляет автоматического регулирования процесса. Они только производят отключение сварочного тока в момент достижения тем или иным параметром процесса (или их группой) заданной величины. Прерыватели, одновременно контролирующие и регулирующие основные параметры процесса, принципиально более совершенны, но их конструкция и электрическая схема значительно сложнее и они пока получили ограниченное применение. К таким прерывателям, в частности, относится прерыватель типа $t_{св} = \text{const}$ и $I = \text{const}$, так как этот прерыватель контролирует процесс по длительности включения, автоматически поддерживая постоянство важнейшего параметра этого процесса — силы тока.

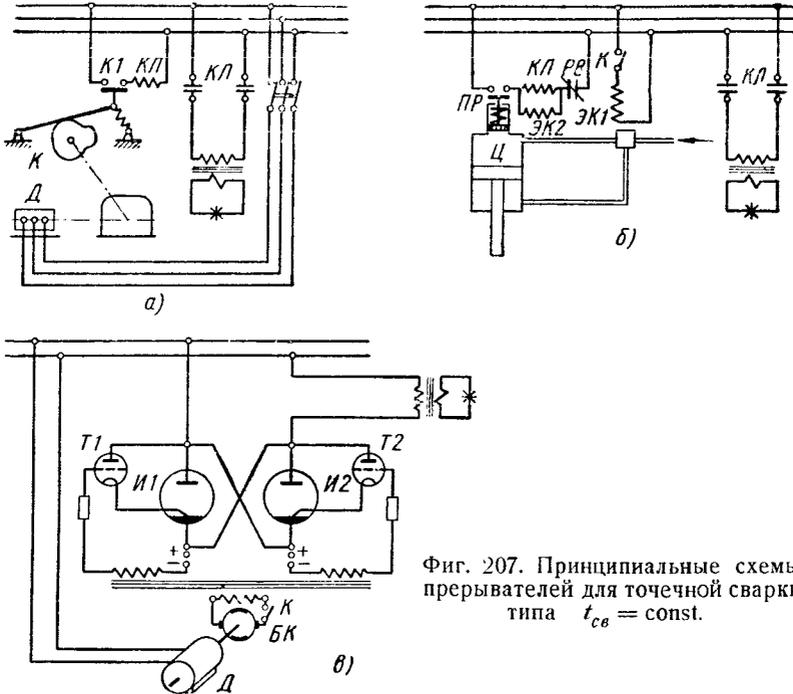
§ 2. ПРЕРЫВАТЕЛИ ТИПА $t_{св} = \text{const}$

Прерыватели этого типа наиболее распространены в промышленности. По существу такой прерыватель является более или менее совершенным реле времени. Прерыватели этого типа могут быть асинхронными или синхронными (см. § 10 гл. VIII). В машинах с электроприводом обычно используется простейший асинхронный кулачковый прерыватель, принципиальная схема которого приведена на фиг. 207, а. Кулачок K приводится во вращение двигателем D и включает контакты KI , замыкающие цепь катушки контактора $KЛ$. В машинах с пневматическим приводом чаще применяется электронное реле времени (иногда пневматическое реле времени) в сочетании с электромагнитным контактором или игнитронным включателем.

При нажатии ключа K (фиг. 207, б) электроклапан $ЭК1$ подает воздух в рабочий цилиндр $Ц$. По достижении в нем заданного давления замыкаются контакты $ПР$ и одновременно включаются контактор $KЛ$ (начинается сварка) и клапан $ЭК2$, подающий сжатый воздух в пневматическое реле времени $PВ$ (не показанное на схеме). По прошествии установленного интервала времени это реле размыкает нормально закрытые контакты $PВ$, заканчивая сварку. Применение асинхронных игнитронных прерывателей (основанных на использовании простейших игнитронных включателей в сочетании с электронными реле времени) в большинстве случаев обеспечивает вполне стабильное качество сварных точек, а переход к более совершенным и сложным синхронным игнитронным прерывателям не дает существенного улучшения качественных результатов сварки. Это объясняется двумя причинами: с одной стороны, тем, что при любом типе игнитронного прерывателя (в том числе асинхронного) выключение тока всегда происходит при его нулевом значении без затяжки, возможной, например, при использовании обычного электромагнитного контактора из-за образования дуги в момент разрыва цепи, и, с другой стороны, тем, что $t_{св}$ входит в первой степени в формулу (1), определяющую количество выделяемого при сварке тепла, в то время

как ток I_2 входит в нее в квадрате. Поэтому колебания в величине $t_{св}$, неизбежные при асинхронном включении, значительно меньше влияют на результаты сварки, чем, например, колебания в величине I_2 .

Преимущества синхронных игнитронных прерывателей: более точная, чем у асинхронных прерывателей, дозировка времени включения, возможность плавного регулирования мощности (путем изменения момента зажигания игнитронов по отношению к синусоиде тока), уменьшение бросков тока в первичной цепи машины вследствие правильного чере-



Фиг. 207. Принципиальные схемы прерывателей для точечной сварки типа $t_{св} = \text{const}$.

дования направления тока в момент его включения и выключения (например, включение всегда производится в положительный, а выключение — в отрицательный полупериод переменного тока; при несоблюдении этого условия, т. е. при включении сварочного трансформатора в полупериод тока, совпадающий по направлению с полупериодом тока в момент его предшествовавшего выключения, в первичной цепи трансформатора протекает очень большой ток из-за повторного намагничивания сердечника трансформатора в одном и том же направлении).

Разработаны два основных типа синхронных игнитронных прерывателей: с электромеханическим и с электронным синхронизирующим устройством. В обоих типах включение первичной цепи сварочного трансформатора осуществляется через два игнитрона $И1$ и $И2$, поджигатели которых включены в анодную цепь вспомогательных тиратронов $Т1$ и $Т2$ (фиг. 207, в). В первом типе синхронного прерывателя после замыкания контактов $К$ (например, в момент срабатывания пневматического реле)

при зажатии свариваемых деталей между электродами коммутатор *БК*, вращаемый синхронным электродвигателем *Д*, начинает подавать в строго определенные моменты времени (по отношению к синусоиде переменного тока) импульсы тока, поочередно отпирающие тиратроны *T1* и *T2*. В результате этого зажигаются соответствующие игнитроны и, таким образом, включается сварочный трансформатор. Регулируя положение щеток коммутатора, можно изменять момент зажигания игнитронов. При этом изменяется эффективная мощность сварочного трансформатора.

Синхронизирующее устройство электронного типа состоит из следующих основных элементов: электронного реле времени, пикового трансформатора и фазорегулятора (см. § 11 гл. VIII). При замыкании пусковой кнопки включается реле времени и пиковым трансформатором начинают подаваться импульсы на сетки вспомогательных тиратронов. Момент подачи этих импульсов может регулироваться фазорегулятором. Этим способом возможно плавное регулирование мощности при сварке. Схема синхронизирующего устройства обычно выполняется таким образом, чтобы первым всегда зажигался один и тот же тиратрон (например, *T1*), который в связи с этим называется ведущим. Поэтому сварка каждой точки начинается с полупериода тока одного и того же направления. По окончании полупериода включения тиратрона *T1* и управляемого им игнитрона *И1* автоматически подается импульс зажигания на тиратрон *T2*, поджигающий игнитрон *И2*. В этом случае тиратрон *T2* называется ведомым. Сварка всегда продолжается четное число полупериодов тока и заканчивается гашением игнитрона *И2*. При этой схеме соблюдается принудительное чередование направления тока при включении и выключении сварочного трансформатора, и повторное одностороннее намагничивание трансформатора невозможно.

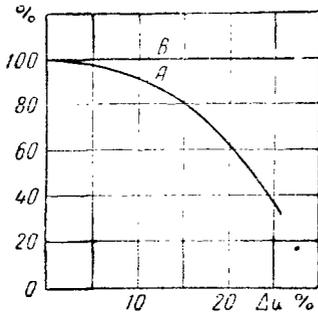
Преимущество электромеханического управления — простота схемы; основной недостаток — наличие вращающихся механизмов и щеточного коммутатора. Синхронные прерыватели серийного выпуска изготавливаются главным образом с электронным управлением (например, игнитронный прерыватель для точечной сварки типа ПИТ-1).

§ 3. ПРЕРЫВАТЕЛИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ $t_{св} = \text{const}$ И $I = \text{const}$

Прерыватели этого типа особенно целесообразны в тех случаях, когда возможны значительные колебания тока при сварке, например при колебаниях напряжения в сети, питающей сварочную машину, и при введении в процессе сварки в контур машины изменяющихся по сечению элементов из магнитной стали. Диаграмма на фиг. 208 иллюстрирует эффективность применения прерывателя рассматриваемого типа. На этой диаграмме по оси абсцисс отложено падение напряжения в процентах по отношению к номинальному, а по оси ординат — разрушающая нагрузка сварной точки при ее испытании на срез. Кривая *A* соответствует сварке с применением обычного синхронного прерывателя типа $t_{св} = \text{const}$, а прямая *B* — применению прерывателя с автоматическим поддержанием постоянства тока. Как видно из диаграммы, при падении напряжения на 20% прочность точки, сваренной при $t_{св} = \text{const}$,

снижается почти на 40% , в то время как при постоянных $t_{св}$ и I это снижение практически отсутствует.

Описываемые прерыватели устроены так, что при падении напряжения автоматически изменяется момент зажигания вспомогательных тиратронов. При уменьшении напряжения удлиняется время фактического включения сварочного тока в течение каждого полупериода и, наоборот, при росте



Фиг. 208. Зависимость прочности сварной точки от падения напряжения в сети при использовании прерывателя типа $t_{св} = \text{const}$ и $I_2 = \text{const}$ (А) и обычного прерывателя типа $t_{св} = \text{const}$.

напряжения длительность этого включения снижается — эффективный ток при этом остается практически постоянным. Серийное производство прерывателей с автоматическим регулированием силы тока в настоящее время осваивается.

§ 4. ПРЕРЫВАТЕЛИ ТИПА $EIt_{св} = \text{const}$

Прерыватель этого типа обеспечивает при сварке каждой точки потребление одинаковой порции электроэнергии. Применяются два способа получения при сварке $EIt_{св} = \text{const}$. Первый использует для этой цели счетчик электроэнергии, отключающий сварочный трансформатор после израсходования на сварку установленного количества электроэнергии. В этом прерывателе колебания в величине EI , наблюдающиеся, в частности, при падении напряжения в сети, автоматически компенсируются соответствующим удлинением $t_{св}$. При протекании тока в первичной цепи сварочного трансформатора диск счетчика поворачивается на угол, пропорциональный количеству израсходованной энергии. При повороте диска на заданный угол замыкаются вспомогательные контакты и автоматически выключается трансформатор — сварка заканчивается. При жестких режимах сварки описанные прерыватели непригодны из-за значительной инерции их движущихся частей. Однако и при мягких режимах сварки прерыватели, выполняемые в виде счетчика электроэнергии, не дают полностью удовлетворительных результатов. Это объясняется, в частности, тем, что при значительном удлинении процесса количество тепла, достаточное для сварки точки в нормальных условиях, становится недостаточным. При загибании сварки увеличиваются потери тепла, связанные с нагревом окружающего ядро точки основного металла свариваемых деталей и с отводом тепла в электроды. Оригинальную схему прерывателя типа $EIt_{св} = \text{const}$ предложил К. А. Кочергин. В этой схеме счетчик энергии реагирует непосредственно на ток в сварочной цепи и

на напряжение между электродами, обеспечивая при сварке постоянство расхода не общего количества энергии, потребляемой из сети, а постоянство расхода полезной энергии в зоне сварки. Экспериментальная проверка этого прерывателя показала хорошее совпадение показателей прочности сварных точек с показаниями шкалы прерывателя. Описанной схеме также присущи недостатки, свойственные всем прерывателям типа $EIt_{cb} = \text{const}$, работающим при переменных значениях t_{cb} .

Значительно лучшие результаты дает второй способ получения $EIt_{cb} = \text{const}$, основанный на использовании для сварки каждой точки заданной порции электроэнергии, расходуемой в течение постоянного или незначительно изменяющегося интервала времени. В этом случае одновременно обеспечивается $EI = \text{const}$ и $t_{cb} = \text{const}$. По этому принципу работают конденсаторные и индукционные машины, осуществляющие сварку запасенной энергией. Если при этом обеспечивается постоянство приложенного к электродам усилия P и диаметра контактной поверхности электродов d_s , то создаются условия для получения сварных точек весьма стабильного качества. В действительности сварка запасенной энергией обеспечивает стабильные результаты. Практическая применимость сварки импульсом запасенной энергии ограничивается величиной этого импульса, увеличение которого приводит к удорожанию сварочных машин из-за увеличения емкости конденсаторов, или увеличения размеров и веса сварочного трансформатора в индукционных машинах.

Существенный недостаток всех описанных систем управления процессом точечной сварки — их нечувствительность к шунтированию сварочного тока. Даже в тех случаях, когда прерыватель поддерживает постоянную силу тока или автоматически изменяет длительность его включения при изменении I , аппаратура реагирует на полный ток, протекающий в первичной (в редких случаях вторичной) цепи машины. Ответвление части тока в шунт, приводящее к уменьшению интенсивности нагрева свариваемой точки, никак не компенсируется описанными прерывателями.

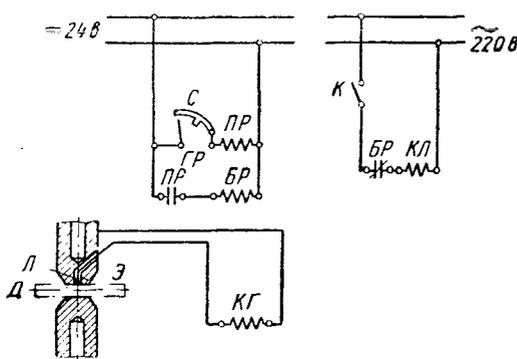
§ 5. ПРЕРЫВАТЕЛИ, РЕАГИРУЮЩИЕ НА ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СВАРИВАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ

В СССР предложены два типа прерывателей, реагирующих непосредственно на изменение физических свойств нагреваемых деталей. В первом типе такого прерывателя контрольным параметром служит температура на поверхности одной из свариваемых деталей в контакте электрод — деталь. Проведенные в ЦНИИТМАШ опыты показали, что при нормальном проваре сварной точки температура в этом контакте к концу сварочного нагрева приближается к $0,5 T_{пл}$, где $T_{пл}$ — температура плавления металла свариваемых деталей. При сварке конструкционных сталей на относительно мягких режимах с длительностью включения тока менее 0,6 сек. удовлетворительный провар точки, как правило, достигается при температуре в контакте $T_s = 600 \div 800^\circ$.

Вторая система управления процессом по нагреву (Д. С. Балковец) основана на том, что при нагреве деталей и в особенности при

расплавлении ядра точки происходит заметное расширение металла. Металл ядра не может свободно расширяться в стороны, так как ядро окружено сравнительно холодным металлом, деформация которого затруднена.

Поэтому его расширение идет главным образом в направлении электродов. При нагреве свариваемых деталей расстояние между электродами увеличивается, а затем после выключения сварочного тока снова уменьшается, причем конечная толщина деталей после их охлаждения, как правило, меньше их начальной толщины вследствие образования при сварке вмятин на поверхности детали. Опытным путем было установлено, что при сварке стали и в особенности аустенитной стали, обладающей большим коэффициентом линейного расширения, деформации во



Фиг. 209. Принципиальная электросхема терморегулятора для точечной сварки.

время сварочного нагрева могут служить мерилем степени их нагрева. Имеется существенная разница между расширением стали, нагретой ниже температуры плавления, и ее расширением после расплавления ядра. Это позволяет судить по степени расширения деталей, т. е. по увеличению расстояния между электродами во время сварки, об отсутствии или наличии ядра расплавленного металла.

Простейшая схема прибора для управления процессом точечной сварки по температуре в контакте электрод — деталь (терморегулятора точечной сварки) изображена на фиг. 209. Сварка начинается замыканием ключа *К*, включающего контактор *КЛ* сварочного трансформатора. Термоэлектродвижущая сила электрода *Э*, возникающая при сварке деталей *Д*, воздействует на катушку специально приспособленного контактного гальванометра *КГ*. Электрод *Э* представляет собой термопару, образованную самим медным электродом и тонкой константановой проволокой *Л*, введенной в просверленные в электроде каналы. Эта проволока обмотана тонкой изоляцией из стеклянного волокна и плотно запрессована в отверстие электрода так, что фактический контакт между константаном и медью, т. е. спай термопары, находится на контактной поверхности электрода.

Вспомогательная цепь постоянного тока напряжением 24 в проходит через стрелку гальванометра, его передвигной контакт *С* и катушку промежуточного реле *ПР*. По достижении заданной температуры T_s на поверхности свариваемых деталей стрелка гальванометра *КГ* замыкает эту цепь, в результате чего срабатывает реле *ПР* и вслед за ним блокировочное реле *БР* разрывает оперативную цепь катушки главного контактора *КЛ* — сварка заканчивается. В промышленной модели терморегулятора контактный гальванометр заменен безинерционным зеркаль-

ным вибратором. Термоэлектродвижущая сила в этом приборе поворачивает зеркальце вибратора. При заданной температуре свариваемых деталей луч света, отражаемый зеркальцем вибратора, освещает фотоэлемент, который через специальное реле (усилитель) отключает главный контактор машины.

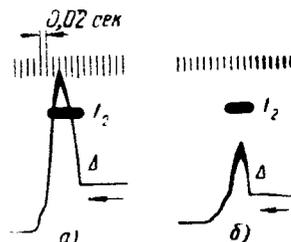
Терморегулятор повышает стабильность качественных показателей сварных точек, уменьшая опасность непровара при уменьшении тока в сварочной цепи из-за увеличения контактной поверхности электродов, из-за случайного увеличения толщины свариваемых деталей и из-за некоторых других причин. Применение терморегулятора не дает положительных результатов при сварке стали с плохо очищенной поверхностью (из-за быстрого выхода из строя электрода-термопары), при сварке на жестких режимах ($t_{св}$ меньше 0,6—0,8 сек.) вследствие инерции термопары (прогрев спая термопары требует относительно большого времени) и при использовании электродов малого диаметра (вследствие их перегрева и выхода из строя термопары). Область рационального применения терморегулятора — сварка стальных деталей толщиной 2—3 мм и выше.

Как указывалось выше, дилатометрический метод контроля и автоматического управления точечной сварки может дать хорошие результаты при сварке деталей из стали, в первую очередь аустенитного класса, и из жаропрочных сплавов. На фиг. 210, *a* и *б* приведены осциллографические записи тока и изменения расстояния между электродами при сварке (Δ) в двух случаях: при хорошем проваре точки (*a*) и при отсутствии провара (*б*). В настоящее время разработана аппаратура для промышленного применения дилатометрического метода контроля процесса точечной сварки стальных деталей.

При выборе типа прерывателя для точечной сварки необходимо учитывать эксплуатационные и технологические требования. К первым относятся простота конструкции и электрической схемы аппаратуры; ее надежность в эксплуатации. Технологические требования определяются видом и толщиной свариваемого материала, конфигурацией и степенью ответственности свариваемого изделия. В настоящее время можно наметить следующие области рационального применения различных способов управления процессом точечной сварки:

1. Асинхронные прерыватели типа $t_{св} = \text{const}$ (с электромеханическим или электронным регулятором времени) при сварке малоуглеродистой стали малой и средней толщины (до 5—6 мм) на относительно мягких режимах ($t_{св} \geq 0,25$ сек.).

2. Асинхронные инерционные прерыватели типа $t_{св} = \text{const}$ при сварке деталей из нержавеющей стали и жаропрочных сплавов и, в отдельных случаях, при сварке деталей из алюминиевых сплавов; длительность включения $t_{св} > 0,10$ сек



Фиг. 210. Запись перемещения электрода (Δ) во время сварки при хорошем (*a*) и плохом (*б*) проваре (Л. С. Балковец).

3. Синхронные игнитронные прерыватели типа $t_{ca} = \text{const}$ для сварки алюминиевых и магниевых сплавов.

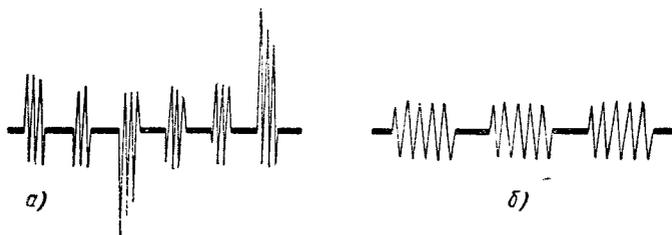
4. Асинхронные или синхронные игнитронные прерыватели типа $I_{ca} = \text{const}$ и $I = \text{const}$ для сварки изделий большого размера из магнитной стали, например, для сварки боковины цельнометаллического вагона.

5. Системы, обеспечивающие $EIt = \text{const}$ при сварке ответственных узлов из алюминиевых сплавов.

6. Сварочные терморегуляторы при сварке стальных деталей толщиной более 2 мм и дилатометры при сварке аустенитных сталей и жаропрочных сплавов.

§ 6. ПЕРЕРЫВАТЕЛИ И МОДУЛЯТОРЫ ДЛЯ РОЛИКОВОЙ СВАРКИ

Как указывалось выше, высокое качество роликовой сварки обеспечивается прерывистым включением сварочного тока. Правильное чередование импульсов тока с паузами заданной длительности достигается прерывателем. При роликовой сварке, так же как при точечной, применяются асинхронные и синхронные прерыватели. При асинхронном

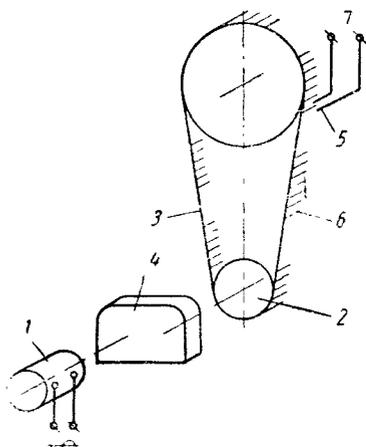


Фиг. 211. Осциллограммы первичного тока в сварочном трансформаторе при роликовой сварке с асинхронным (а) и синхронным (б) включением.

включении наблюдаются значительные броски тока в первичной цепи сварочного трансформатора (фиг. 211, а), сопровождаемые менее значительными колебаниями тока в сварочной цепи. При синхронном включении (фиг. 211, б) каждый импульс тока имеет строго определенную длительность с регулярным чередованием направления тока в момент его включения и выключения. Количество тепла, выделяемое в течение каждого импульса тока, — одинаково, в связи с чем качество шва однородно по всей его длине.

В современной практике роликовой сварки ответственных изделий наибольшее распространение получил игнитронный синхронный прерыватель. Применяются два основных типа синхронных прерывателей для роликовой сварки: с электромеханическим и с электронным синхронизатором. В первом типе прерывателя используется коммутатор, приводимый в движение синхронным электродвигателем. Одна из возможных схем такого синхронизатора показана на фиг. 212. Синхронный электродвигатель 1 вращает звездочку 2 цепной передачи 3 через редук-

тор 4. Цепь имеет 100 звеньев. Передача сконструирована так, чтобы в течение 1 сек. мимо контактной системы 5 проходили все 100 звеньев цепи. В каждом звене имеется отверстие для закрепления штифта 6. При прохождении штифта мимо контактов 5 последние кратковременно замыкаются, подавая через оперативную цепь 7 необходимый импульс тока на вспомогательный трансформатор, вспомогательные тиристоры и силовые игнитроны прерывателя. При этом момент фактического зажигания игнитронов определяется настройкой отдельного пикового трансформатора, которая осуществляется соответствующим фазорегулятором. Каждый штифт, закрепленный в цепи прерывателя, обеспечивает включение сварочного тока на один полупериод. Чередую в заданной последовательности звенья с штифтами и без них, удается получить требуемый сварочный цикл. Например, чередуя шесть звеньев с штифтами и четыре звена без штифтов, получим длительность импульса сварочного тока 0,06 сек. при паузе 0,04 сек. Легко показать, что при этом знак тока при его включении и выключении будет разным. Как следствие, исключается повторное намагничивание трансформатора в одном направлении, ведущее к значительным броскам тока в первичной цепи трансформатора. Возможно также применение барабанных коммутаторов и других систем синхронизаторов с использованием синхронного двигателя в качестве основного элемента схемы.

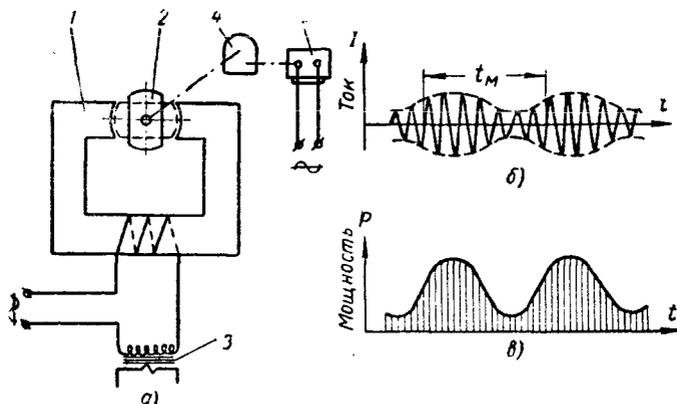


Фиг. 212. Схема электромеханического синхронизатора к прерывателю для роликовой сварки.

Синхронизаторы второго типа не имеют вращающихся элементов. Длительность и частота импульсов тока определяются электронными регуляторами. В частности, по этой схеме выполняются серийные прерыватели типа ПИШ-2-2. Недостаток этих прерывателей — сложность электрической схемы, затрудняющая их обслуживание в эксплуатации. Прерыватели с электромеханическими синхронизаторами проще. В то же время по эксплуатационным качествам они не уступают прерывателям с электронными синхронизаторами.

Удовлетворительное качество шва при роликовой сварке может быть получено, как правило, не только при полном выключении сварочного тока на время пауз, но и при его периодическом уменьшении. Устройство для периодического уменьшения тока в сварочной цепи роликовой машины называется модулятором. Простейший модулятор представляет собой дроссель 1 (фиг. 213, а) с вращающимся ярмом 2 в магнитной цепи. Дроссель включается в первичную цепь сварочного трансформатора 3. Ярмо 2 соединяется через коробку скоростей 4 с валом синхронного двигателя 5. Сопротивление магнитной цепи дросселя изменяется в зависимости от положения вращающегося ярма, при большом

зазоре в магнитной цепи (ярмо изображено сплошными линиями) сопротивление этой цепи велико, а индуктивность дросселя относительно мала; при малом зазоре (ярмо показано пунктиром) сопротивление магнитной цепи понижается, а индуктивность дросселя растет. В первом случае в сварочной цепи протекает наибольший ток, во втором — наименьший. Изменение тока и мощности при вращении ярма показано графически на фиг. 213, б и в. Длительность одного цикла изменения тока t_m определяется числом оборотов ярма и регулируется переключением коробки скоростей. Недостаток описанного модулятора — невоз-



Фиг. 213. Модулятор для роликовой сварки:

а — принципиальная схема; б — кривая изменения (модулирования) тока;
в — кривая изменения мощности.

можность изменения формы кривой модулированного тока. Это ограничивает применимость таких модуляторов сваркой стали, у которой, как указывалось в гл. VII, отношение $\frac{t_{св}}{t}$ близко к 0,5. Для сварки цветных металлов эти модуляторы непригодны. Известны модуляторы более сложных систем, допускающие получение любого отношения между длительностью периодов максимального и минимального токов. Однако эти модуляторы сложны и дороги — они не могут конкурировать с синхронными игнитронными прерывателями.

ГЛАВА XIV

УСТАНОВКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ МАШИН ДЛЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

§ 1. УСТАНОВКА МАШИН

При установке машин для контактной сварки необходимо:

- а) расположить машины в цехе с учетом намечаемого технологического процесса;
- б) обеспечить удобное обслуживание машины;
- в) обеспечить питание машины электроэнергией, не нарушающее нормальной работы других цеховых потребителей энергии (двигателей, освещения);
- г) предусмотреть удобную подачу и отвод воды для охлаждения;
- д) при установке машин с пневматическим приводом обеспечить подачу к машине сжатого воздуха необходимого давления и в требуемом количестве.

Машины для контактной сварки могут располагаться в любом месте отапливаемого или утепленного цеха (замерзание охлаждающей воды должно быть исключено, в особенности в машинах, использующих игнитроны), так как при их эксплуатации, как правило, не выделяется вредных газов или излучений, требующих специальной защиты или ограждения этих машин. В связи с этим машины обычно располагаются непосредственно в технологическом потоке. При точечной сварке, и в особенности при стыковой сварке оплавлением, вылетающие из зоны сварки частицы раскаленного металла, попадая на обработанные поверхности соседних станков и машин, могут их портить. Поэтому станочное оборудование должно располагаться на достаточном расстоянии от стыковых машин. Кроме того, непосредственно на стыковой машине применяются местные защитные устройства.

В целях экономии рабочих площадей вспомогательное оборудование и аппаратура часто размещаются не на полу, а на специальных кронштейнах, укрепляемых на стене или колонне. Иногда вспомогательное оборудование устанавливается на антресолях (см. фиг. 191).

Удобное обслуживание машины предусматривает свободный доступ ко всем ее частям. При этом должны соблюдаться общие нормы по установке станочного оборудования, относящиеся к минимально допустимым расстояниям между станками, минимальным проходам и расстояниям до стен. Особо необходимо предусматривать возможность извлечения из

машины сварочного трансформатора для его ремонта без общей разборки всей машины.

Способ присоединения контактных машин к цеховой электросети имеет большое значение как для работы этих машин, так и для эксплуатации других электрических машин и аппаратов, находящихся в цехе. Контактная машина, как правило, снабжена однофазным трансформатором. Поэтому при наличии нескольких контактных машин в цехе их следует питать от различных фаз, обеспечивая по возможности равномерное распределение нагрузки между всеми фазами. При кратковременном включении сварочной машины большой мощности часто наблюдается резкое падение напряжения в цеховой сети, ведущее к неприятному миганию электрических ламп. Этого можно избежать питанием мощных сварочных машин от отдельного силового трансформатора. В цехах с большим количеством сварочных машин такая система питания дает наилучшие результаты и широко применяется. Особенно неблагоприятно сказывается на работе цеховой сети включение мощных сварочных машин между фазой и землей (иногда делаются попытки включить таким образом машину с трансформатором на 220 в в сеть 380 в), так как оно ведет к значительному перекосу фаз, напряжение на зажимах сварочного трансформатора при таком включении может упасть против номинального на 20—30%, а напряжение на других фазах, наоборот, может вырасти. Это вызывает ускоренное перегорание электроламп и ненормальную работу электродвигателей, в результате которой, в частности, возможно ухудшение качества механической обработки на металлорежущих станках.

Падение напряжения в проводах, питающих машины для контактной сварки, не должно превышать 5%. Поэтому при расчете проводов они проверяются не только на нагрев, но и на падение напряжения. В связи с этим сечение проводов должно увеличиваться с увеличением расстояния между машиной и источником ее питания, хотя нагрев проводов не зависит от этого расстояния, а зависит только от плотности протекающего в них тока. При установке в цехе большого количества сварочных машин их питание производится от общих шин, проходящих вблизи мест установки машин. При этом уменьшается расход меди в проводах и обеспечивается минимальное падение напряжения на участке цепи между силовым и сварочным трансформаторами.

При выполнении особенно ответственных сварочных операций, когда для обеспечения стабильного качества сварки требуется жесткое соблюдение постоянства всех параметров сварочного режима, значительные колебания напряжения в сети, питающей машину, недопустимы. В этом случае могут быть применены специальные вольтодобавочные трансформаторы.

Машины для контактной сварки обычно имеют относительно низкий коэффициент мощности ($\cos \varphi$). Для улучшения $\cos \varphi$ иногда применяются компенсационные устройства. В частности, для этой цели могут быть использованы конденсаторы, включаемые параллельно сварочному трансформатору.

Помимо специальных выключающих устройств, предусматриваемых в самой сварочной машине, ее присоединение к сети всегда должно производиться через самостоятельный рубильник и плавкие предохранители. Выключение рубильника дает возможность производить осмотр и мелкий ремонт специальных выключающих устройств, а также удобную замену плавких предохранителей. Сечение предохранителей подбирается по номинальному току в первичной цепи сварочного трансформатора.

Для охлаждения применяется как питьевая, так и техническая вода. Применение очищенной воды более желательно, так как при этом уменьшается количество отложений в трубках.

Перед сварочной машиной в питающем трубопроводе устанавливается индивидуальный кран, позволяющий регулировать подачу воды в машину и вовсе прекращать ее на время длительных остановок, например в конце рабочей смены. Слив охлаждающей воды из машины в канализацию должен обязательно осуществляться через открытую воронку, расположенную так, чтобы во время работы сварщик мог ее видеть. При нескольких параллельных ветвях водяного охлаждения, например, при самостоятельном охлаждении трансформатора и электродов, каждая ветвь должна иметь свой открытый слив. Это дает возможность следить за нормальным поступлением воды в каждую ветвь охлаждения. При сливе воды через общую трубку засорение одной из ветвей системы охлаждения может остаться незамеченным, что приведет к порче того или иного элемента машины, например, стгоранию трансформатора, быстрому выходу из строя неохлаждаемых электродов и т. п.

Работа машин с пневматическим приводом зависит от условий их питания сжатым воздухом. Для нормальной работы этих машин давление в сети, как правило, должно быть не ниже 5 *ати*. Если сварочная машина не имеет встроенного воздухохборника, то у машины должен быть установлен самостоятельный сборник, сглаживающий колебания давления в воздушной сети и обеспечивающий подачу в машину в момент сварки большого количества воздуха вне зависимости от пропускной способности магистрали, соединяющей машину с компрессором или общецеховым воздухохборником. Поступающий в машину воздух должен по возможности осушаться и фильтроваться. Необходимые для этой цели устройства обычно предусматриваются в цеховой сети сжатого воздуха.

§ 2. ЭКСПЛУАТАЦИЯ МАШИН И ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

Эксплуатация машин для контактной сварки состоит из систематического наблюдения и ухода за их механизмами и электрооборудованием. Помимо регулярной смазки движущихся частей привода, необходимо следить за чистотой направляющих (в первую очередь стыковых машин). В стыковых машинах необходимо периодически проверять отсутствие зазоров в направляющих и элементах механизма подачи подвижной плиты. Для этой цели стальной брусок или прут зажимают в обоих зажимах машины, так что сближение электродов становится невозможным, и затем, не включая сварочного тока, начинают поворачивать рукоятку

привода подачи плиты или вращать вручную главный вал этого привода (в машинах с электрическим приводом). Угол их поворота, возможный без фактического сближения плит машины, характеризует величину имеющихся в системе зазоров. Зазоры появляются вследствие срабатывания зубьев в червячных и шестеренных передачах, срабатывания втулок и валиков в шарнирных соединениях, ослабления шпонок и болтовых соединений, разработки подшипников и вследствие других причин. При обнаружении зазоров вызывающие их причины должны быть устранены путем смены изношенных деталей, изменения взаимного положения элементов зацепления в момент наибольшей их нагрузки, т. е. при осадке, и т. п. Периодически должны производиться также проверка и регулировка направляющих.

При эксплуатации машин для роликовой сварки особого наблюдения требует скользящий контакт в сварочной цепи, одновременно являющийся ответственным элементом как механической, так и электрической части машины. Во время работы машины ось сварочного ролика должна свободно вращаться в подшипнике, не имея при этом качания.

Особого внимания требует поддержание заданных размеров и чистоты контактной поверхности электродов.

Работа электрической части сварочных машин также требует систематического наблюдения и ухода. Сварщик должен в первую очередь следить за нормальной работой системы водяного охлаждения с тем, чтобы элементы машины и электроды не перегревались.

При интенсивной работе сварочной машины элементы ее сварочной цепи могут значительно нагреваться. При этом наблюдается заметное окисление контактных поверхностей в местах соединения отдельных элементов сварочного контура. Это ведет к резкому повышению контактного сопротивления и, как следствие, к росту общего сопротивления сварочной цепи; при заданном вторичном напряжении ток в сварочной цепи уменьшается и машина начинает работать вяло. В связи с этим при интенсивной эксплуатации все элементы сварочной цепи машины каждые 1—2 месяца должны разбираться. При этом контактные поверхности очищаются до металлического блеска и после сборки все контакты надежно стягиваются болтами.

В первичной цепи сварочной машины систематического наблюдения требуют механические выключатели и электромагнитные контакторы. Контакты этих устройств часто загрязняются и обгорают. В связи с этим каждые 2—3 дня необходимо эти контакты очищать шкуркой или личным напильником. При наличии асинхронных и синхронных прерывателей, и в особенности при эксплуатации синхронных прерывателей для точечной и роликовой сварки, наблюдение за их работой существенно облегчается применением осциллографа, наличие которого при большом парке контактных машин автоматического действия может считаться обязательным.

Оценка условий труда при контактной сварке и выработка мероприятий по технике безопасности при этом виде сварки должны производиться с учетом: а) выделения при сварке лучистой теплоты; б) загрязнения воздуха; в) опасности ожогов; г) возможности поражения электрическим током.

Выделение лучистой теплоты при контактной сварке относительно невелико. При точечной и роликовой сварке оно не имеет практического значения. Даже при стыковой сварке вследствие кратковременности теплового воздействия не требуется специальных мер для защиты сварщика от нежелательного теплового облучения. При контактной сварке и, в первую очередь, при стыковой сварке оплавлением выделяется большое количество металлической пыли, загрязняющей воздух. При этом выделяется некоторое количество СО. В тех случаях, когда производится сварка цветных металлов или сталей с покрытиями, при нагревании которых возможно выделение вредных веществ, например свинца или цинка, должна быть предусмотрена местная или общая приточно-вытяжная вентиляция.

Сварщик должен быть защищен от ожогов, возможных при выплесках во время точечной и роликовой сварки и при сварке оплавлением. В последнем случае на машине предусматривается местная защита рабочего места сварщика от прямого попадания туда вылетающих из зоны сварки частиц расплавленного металла. При точечной и роликовой сварке глаза сварщика защищаются очками с бесцветными стеклами. Кроме того, сварщик снабжается фартуком и рукавицами.

Наибольшую опасность для сварщика представляет поражение электрическим током. Вторичное напряжение контактных машин невелико и не представляет непосредственной опасности для сварщика. Однако при случайном повреждении изоляции между первичной и вторичной обмотками сварочного трансформатора сварщик может подвергнуться воздействию высокого напряжения. В связи с этим одна точка вторичной цепи машины всегда соединяется электрически со станиной машины, а сама станина должна быть надежно заземлена.

ОРГАНИЗАЦИЯ ТРУДА, ПРИНЦИПЫ НОРМИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ ПРИ КОНТАКТНОЙ СВАРКЕ

§ 1. СТАХАНОВСКИЕ ПРИЕМЫ РАБОТЫ И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ииж. КОВАЛЕВА

Точечная сварка. При точечной сварке значительная часть времени затрачивается сварщиком на вспомогательные операции (установку свариваемых деталей в машине, во многих случаях на сборку деталей перед сваркой, на зачистку и зашлифовку электродов). Общая трудоёмкость изготовления сварного узла может быть существенно понижена, а съём продукции с точечной машины увеличен при разделении труда сварщика и сборщика.

Например, при сварке одного узла с 15 точками в каждом сварщик, выполняя необходимые сборочные операции, сваривал за смену 150 изделий. После перехода на стахановский метод работы два сварщика с одним сборщиком стали выдавать в смену 750 узлов. Таким образом, выпуск на одного рабочего увеличился на 60%, а съём с каждой сварочной машины — на 150%.

Правильная организация электродного хозяйства может повысить производительность труда сварщика дополнительно на 10—20%. Для этого необходимо применять электроды из специальных сплавов, обладающих высокой стойкостью, снабжать сварщиков инструментом и простейшими приспособлениями для заправки электродов, обеспечивать каждого сварщика запасным комплектом электродов с тем, чтобы при значительной деформации установленных на машине электродов они могли быть немедленно заменены сварщиком без потери времени на длительное зашлифовывание изношенных электродов. Помимо этого, должно быть обеспечено обильное охлаждение электродов.

Для облегчения установки свариваемых деталей целесообразно применение шаблонов и световых указателей; последние создают на поверхности деталей световой зайчик, положение которого совпадает с положением контактной площадки электрода после того, как он придет в соприкосновение со свариваемыми деталями.

Повышение производительности труда при точечной сварке может быть также достигнуто путем уменьшения машинного времени точечной сварки, т. е. за счет сокращения длительности сварочного цикла. В этом отношении значительными преимуществами обладают точечные

машины с плавным регулированием длительности цикла, например современные серийные машины типа МТП. По мере освоения той или иной операции стахановец-сварщик может увеличивать темп сварки.

Важнейшим условием обеспечения стахановских методов труда при точечной и других способах контактной сварки является поддержание сварочной машины в отличном состоянии. При точечной сварке основное значение имеют чистота переходных контактов в сварочной цепи машины и четкая работа включающих устройств. Иногда производительность труда сварщика снижается также из-за значительного падения напряжения в сети, питающей машину. Это падение напряжения вызывает необходимость удлинения времени нагрева точки. Нормальные условия для стахановской работы могут быть созданы увеличением сечения проводов, увеличением мощности силового трансформатора на подстанции или подключением вольтодобавочного трансформатора.

Роликовая сварка. Условия обеспечения высокой производительности труда при роликовой сварке во многом сходны с условиями точечной сварки. Особое значение при роликовой сварке имеет интенсивное охлаждение сварочных роликов. Приспособления для непрерывной заправки рабочего профиля роликов, например стальные шарошки или специальные пружинные головки с резами, заметно повышают производительность труда при роликовой сварке. Производительность роликовой сварки иногда может быть существенно повышена путем увеличения шага между смежными точками. Это возможно, в первую очередь, в тех случаях, когда шов не должен быть плотным.

Увеличение шага позволяет повысить скорость сварки без увеличения мощности машины. Одновременно уменьшаются сварочные деформации. При значительном увеличении шага точек роликовая сварка превращается в точечную. При этом достигается очень высокая производительность труда.

При роликовой сварке громоздких изделий значительный эффект дает применение приспособлений, поддерживающих свариваемое изделие. Такое приспособление часто заменяет подручного сварщика, существенно понижая общую трудоемкость сварочной операции.

Стыковая сварка. При сварке оплавлением значительная часть времени, так же как при других способах контактной сварки, расходуется на установку и зажатие свариваемых деталей в электродах. При сварке деталей с точными размерами очень эффективно применение быстродействующих однооперационных зажимов. При сварке деталей малого и среднего сечения (до 1000—1500 мм²) существенное увеличение производительности обеспечивается при использовании мощных машин, работающих по принципу непрерывного оплавления. Такие машины в сочетании с быстродействующими пневматическими зажимами позволяют в отдельных случаях сваривать до 800—900 деталей в час. Например, такая относительно громоздкая деталь, как обод автомобильного колеса, сваривается встык с производительностью до 450 шт. в час.

Применение высокопрочных электродов, обладающих достаточной электропроводностью, существенно ускоряет установку свариваемых деталей, так как уменьшается затрата времени на подгонку кромок, связанную с неточностью размеров электродов.

Метод инж. Ковалева, как известно, состоящий в детальном изучении всех элементов рабочего процесса ряда стахановцев, выполняющих одинаковую операцию, отборе наиболее совершенных и производительных методов выполнения каждого из этих элементов и последующем освоении этих лучших методов всеми стахановцами, должен найти широкое применение в контактной сварке. Например, при ручной стыковой сварке вся операция может быть подразделена на следующие элементы: установку и зажатие свариваемых деталей, выверку их положения в зажимах, сварку и освобождение деталей из машины.

§ 2. ПРИНЦИПЫ НОРМИРОВАНИЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

Время, необходимое для выполнения той или иной сварочной операции, складывается из основного, так называемого операционного, и прибавочного времени.

Основное время состоит из двух элементов: технологического времени T , затрачиваемого непосредственно на выполнение основной операции (например, времени на подогрев, оплавление и осадку при стыковой сварке), и вспомогательного времени B , расходуемого на установку, зажатие, перемещение, центровку деталей и т. п.

Времена T и B даются в минутах на одну операцию или отдельный ее элемент (переход или прием). Они зависят от типа оборудования и веса свариваемых деталей, а также от характера технологического процесса.

Прибавочное время, расходуемое неравномерно в течение рабочего дня, обычно дается в процентах к операционному времени и состоит из: а) времени на подналадку машин n (запиливание и смену электродов, регулировку давления, очистку от брызг металла и т. д.); б) вспомогательного времени обслуживания машин v_s (пуска и остановки машины, пуска водяного охлаждения, времени на предварительный прогрев ионных приборов и т. д.); в) времени на организационное обслуживание рабочего места b (уборку рабочего места, смазку машины и т. д.); г) времени на отдых (при сварке тяжелых узлов) и на естественные надобности e .

Общая норма времени на выполнение одной сварочной операции (штучное время) определяется по формуле

$$T_{шт} = (T + B) \frac{1 + n + v_s + b + e}{100}. \quad (82)$$

В эту норму не входит время на переналадку машины с одной операции на другую. Переналадка может производиться между рабочими сменами или в обеденный перерыв специально выделенными для этого наладчиками.

Технологическое время T в основном определяется заданным режимом сварки. Оно зависит от сечения или толщины свариваемых деталей, вида свариваемого материала, мощности и степени автоматизации сварочной машины. Вспомогательное время B уменьшается при оснащении процесса приспособлениями, при использовании быстродействующих зажимов и т. д.

Расход прибавочных времен при контактной сварке лежит в пределах: время на подналадку $n = 5 \div 10\%$; вспомогательное время управления станком $a_s = 1 \div 2\%$; время на организационное обслуживание $b = 1 \div 2\%$; время на естественные надобности $e = 2\%$. При сварке тяжелых узлов это время увеличивается еще на 2% с учетом отдыха

§ 3. РАСХОД ЭЛЕКТРОДОВ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

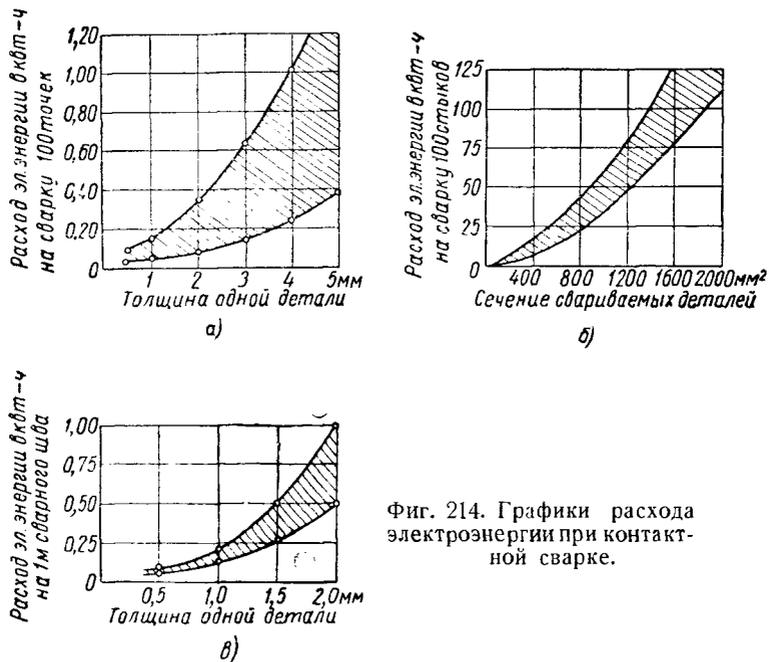
Электроды и ролики при контактной сварке изнашиваются и должны систематически сменяться. Их стойкость зависит главным образом от использованного материала и от их геометрической формы, режимов сварки и интенсивности охлаждения. Существенное влияние на стойкость электродов оказывает также чистота поверхности свариваемого металла.

Большое количество факторов, влияющих на стойкость электродов при контактной сварке, затрудняет разработку единых нормативов их стойкости. Некоторое представление о стойкости электродов и о расходе меди на их изготовление дают следующие цифры:

Число точек, свариваемых на декапированной стали до полного износа медных электродов	10 000—30 000
Расход меди на 1000 точек при сварке декапированной стали в г	10—50
Число свариваемых стыков до полного износа медных электродов	5 000—15 000
Расход меди на сварку 1000 стыков в г	200—450
Длина шва, свариваемого до полного износа медных роликов (сварка декапированной стали с интенсивным охлаждением), в м	До 2000
Расход меди на 100 м свариваемого шва в г	100—300

Приведенные данные соответствуют нормальной конструкции электродов с интенсивным охлаждением. В случае точечной и роликовой сварки хорошо очищенной горячекатанной стали стойкость электродов снижается по сравнению со стойкостью при сварке декапированной холоднокатанной стали, а расход меди увеличивается приблизительно на 15% . Стойкость специальных сплавов, например сплавов ЭВ и МЦ4, в 3—5 раз выше стойкости меди. При использовании специальных сплавов соответственно уменьшается их расход.

Расход электроэнергии при контактной сварке зависит от материала свариваемых деталей, их толщины или сечения, а также от режима сварки и типа применяемого оборудования. На фиг. 214, а приведен график зависимости расхода энергии на сварку 100 точек (в *квт-ч*). Верхняя кривая соответствует сварке на мягком режиме, а нижняя —



Фиг. 214. Графики расхода электроэнергии при контактной сварке.

сварке на жестком режиме. Приведенные кривые наглядно показывают исключительно большое влияние характера процесса сварки на расход электроэнергии.

Расход электроэнергии на 100 стыков при сварке оплавлением деталей из конструкционных сталей показан на фиг. 214, б. На фиг. 214, в показаны пределы расхода электроэнергии на 1 м шва при роликовой сварке малоуглеродистой стали различной толщины. Большой расход электроэнергии соответствует меньшей скорости сварки на машинах малой мощности.

§ 4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ ПРИ КОНТАКТНОЙ СВАРКЕ

Характер, последовательность и режимы отдельных операций по изготовлению сварных изделий обычно записываются в технологических картах. Применяются два основных типа технологических карт: операционно-технологические карты и инструкционные карты.

Операционно-технологические карты содержат данные о последовательности выполнения в цехе всех сварочных операций, а также всех

остальных несварочных операций, производимых в промежутке между сварочными операциями, и о прохождении свариваемого изделия по цеху, т. е. о его маршруте. В этих картах указываются используемое оборудование и время его загрузки. Данные о режимах выполнения отдельных сварочных операций в операционных картах обычно не приводятся. В условиях индивидуального и мелкосерийного производства часто ограничиваются составлением операционно-технологических карт. При этом сварщик, выполняющий ту или иную операцию, получает все необходимые указания о режиме сварки от мастера или технолога. Пример операционно-технологической карты одного из заводов дан в приложении 1.

В крупносерийном и массовом производствах, помимо операционно-технологических карт, как правило, разрабатывается и записывается в инструкционных картах подробная технология выполнения каждой сварочной операции. В инструкционной карте приводятся полные данные о типе сварочной машины, необходимом инструменте (электродах, электрододержателях, контрольных шаблонах, мерительном инструменте и т. д.) и приспособлениях для сварки и сборки (если сборочные операции объединяются со сварочными). В инструкционной карте делаются ссылки на номера чертежей и клейма всех приспособлений и инструмента, что облегчает своевременное снабжение ими рабочего места сварщика. В инструкционной карте приводятся исчерпывающие данные по режиму сварки, позволяющие воспроизводить этот режим без дополнительных указаний со стороны мастера или технолога.

Типовая инструкционная карта одного из заводов приведена в приложении 2.

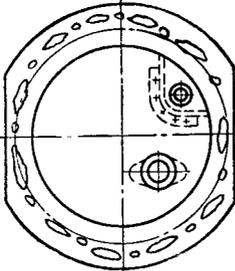
Иногда в инструкционной карте дается детальный перечень всех основных и вспомогательных переходов, необходимых для выполнения операции в целом, с соответствующими нормами времени, а также данные о расходе материалов для изготовления электродов.

В приложении 3 приведен пример оформления и заполнения инструкционной карты на роликовую сварку, включающей данные по нормированию. Аналогичные карты применяются и для других видов контактной сварки.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Операционно-технологическая карта

Наименование детали — крышка картера заднего моста в сборе

Технологический отдел Цех рамный	Изменения детали				Деталь № Дата чертежа детали Дата составления карты Количество листов Лист 2
Отделение — картера	№ приказа	№ операции	Дата	Подпись	
Прохождение по цехам	8510				
Количество на машину					Отходы использованы на детали №
Тип машины					
Количество на машину	Размер заготовки	на одну деталь	кратной длины	заготовки	
Наименование и марка	Профиль и размер	Сборная			

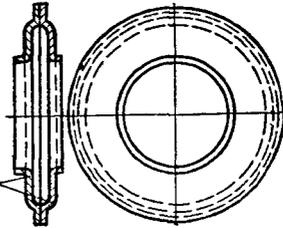
ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Завод: Цех: <i>рамный</i> Отд. главного технолога Сектор сварки		Инструкционная карта по сварке № 5694						Колнч. листов 8 Лист. № 6		
		Наименование	Дет. крышка картера узла заднего моста		№ дет., узла	№ операц. по основн. технологии		Дата чертежа <i>16/II-50</i>		
№ по нар.	Наименование	№ детали	Дата	Приказ	Матер.	Детали	Полг. перед сваркой	Оборудование	Рабочий и измерит. инструмент	
										Наименование
1	Крышка картера	12-241014	16/II-50 г.	8510	Ст. 08	1,5 мм	Дет. д. б. очищены от грязи, окалин, ржавчины	Тип машины Фирма Мощн. в квт Инвент. №	Св. пресс 400 38878	Комплект <i>Электродов 62-У-167003</i> <i>Наконечн. 62-У-1539932</i>
2	Бобышка проблемн. отлив. картера	12-241023-Б	16/II-50 г.	8510	Хол.-пята, прутков, сталь А-12	Круг Ø 41,5		Месторасположение % загрузки	2200	

Собираемые детали

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Инструкционная карта		№ 6		Наименование узла или детали				Компенсатор		№ узла		2Г65-С ₄	
Наименование операции				Цех: Прессовый		Полот.		Наименование		№ машины		5299	
Сварка тарелок компенсатора				Отд.: Сварочное		к сварке		Станок		№ опр.		1	
№ по пор.	№ деталей	Марка материала	Вес загот.	Вып. из заж.	Прип. в. м. м	Травить	Ролико	МШП-100-2	Завод-изготовитель, модель	Мощность			
1	2Г65-03	Ст. 10	0,215	—	—	Травить	Роликовая	—	З-д	100 ква			
2	2Г65-03		0,215	—	—	"	машина	—	"Электрик"				
			0,43										
Электроды и инструмент													
№ по пор.	Наименование или марка	№ или индекс		Стойкость									
1	Электрод верх.	Ø 225 тип 1		5500									
2	" ниж.	Ø 120 тип 4		1572									
3													
Приспособления													
№ по пор.	Наименование		№ или индекс										
1	Вращающееся приспособление		П-32										
Режим работы на дугов. и газ. постах													
Сила тока в а		№ наконечн.		Давл. кислор. в ат		Давл. ацетил. в ат							
—		—		—		—							

2Г65-03
Ø-1,5

L = 0,48 м

Режим работы на контактных машинах

№ по пор.	Секцион-переключ.(ступень)	Время включенны тока	Положение рукоятки кораб. скор.	Рабочая поверхность элсродра	Усилие на электродах	Оплавление в м.м	Осадка	
							без тока	под током
		$t_{св} = 0,6$ $t = 0,1$ сек.	Рабочая поверхность элсродра		320 кг	—		
№ по пор.	Наименование приемов	Время в мин.		№ по пор.	Наименование приемов	Время в м.м.	перекрывае-е и перекры-ваемое	
		перекрывае-мое	неперекрывае-мое				перекрывае-мое	не перекры-ваемое
1	Взять деталь	0,018		8	Вынуть оправку	0,016		
2	Надеть на оправку	0,045		9	Вставить оправку	0,020		
3	Взять вторую деталь	0,018		10	Подвести к роликам	0,015		
4	Надеть на оправку	0,045		11	Нажать педаль	0,012		
5	Поднести к машине	0,015		12	Сварить (автоматич.)	0,557		
6	Нажать педаль	0,012		13	Снять узел с оправки	0,018		
7	Отвести оправку	0,010		14	Отложить узел в ящик	0,018		

Норма времени в мин.

Машинно-ручное Т.ж.р	Машинно-ручное Т.ж.р	Ручное В	Подналадка П	Естествен. надобн. и отдых. Е	Обработ.-жив. Б	Вспомог. время управл. станк. Пв	Подготов.-заключ. время	Норма врем. на 1 шт. в мин.	Норма вырабо. в смену	Разр. раб.	Кол. руб.

Нормы расхода на операцию

Расход электро-энергии в кет-ч	Расход электродов в г	Расход присад. провол. в кг	Расход флюсов в кг	Расход кислорода в м³	Расход ацетилена в м³	Технолог	
						Ст. технолог	Утверди т
0,132	1,55	—	—	—	—	—	—

О Г Л А В Л Е Н И Е

	Стр.
Введение	3
Глава I. Основные способы контактной сварки	8
§ 1. Классификация контактной сварки	8
§ 2. Стыковая сварка и сварка по методу Игнатъева	9
§ 3. Точечная, рельефная и Т-образная сварка	11
§ 4. Роликовая и ролико-стыковая сварка	14
Глава II. Электротермические процессы при контактной сварке	17
§ 1. Закон Ленца-Джоуля и удельное сопротивление	17
§ 2. Электрическое сопротивление контакта	19
§ 3. Электрическое сопротивление при стыковой сварке	22
§ 4. Электрическое сопротивление при точечной сварке	25
§ 5. Теплофизические свойства металлов и сплавов	29
§ 6. Особенности нагрева при контактной сварке	31
§ 7. Нагрев при стыковой сварке	33
§ 8. Нагрев при сварке по методу Игнатъева	41
§ 9. Нагрев при точечной сварке	42
§ 10. Шунтирование сварочного тока	47
Глава III. Поведение различных металлов и сплавов при контактной сварке	52
§ 1. Свариваемость при контактной сварке	52
§ 2. Особенности сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей	54
§ 3. Особенности сварки сталей аустенитного класса	63
§ 4. Особенности сварки алюминия и его сплавов	67
§ 5. Особенности сварки меди и ее сплавов	69
Глава IV. Технология стыковой сварки	72
§ 1. Типовые узлы и подготовка деталей к сварке	72
§ 2. Сварка стали сопротивлением	76
§ 3. Особенности сварки оплавлением	78
§ 4. Сварка оплавлением малоуглеродистой стали	88
§ 5. Особенности сварки оплавлением углеродистых и легированных сталей	95
§ 6. Методы выбора режима стыковой сварки стали	98
§ 7. Особенности технологии стыковой сварки колес, рельсов, труб, тонких листов и звеньев цепей	99
§ 8. Дефекты стыковой сварки конструктивных сталей и контроль качества сварных стыков	105
§ 9. Применение стыковой сварки в инструментальном производстве	108
§ 10. Технология сварки по методу Игнатъева	113
§ 11. Стыковая сварка цветных металлов и сплавов	115