

Министерство образования и науки, молодежи и спорта Украины

Донбасская государственная машиностроительная академия

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

по дисциплине

«Технология и оборудование сварки давлением»

для студентов специальности 6.05050401

дневной и заочной формы обучения

Утверждено

на заседании кафедры ОиТСП

Протокол №20 от 05.06.2012 г.

Краматорск, 2012

Введение.

Контактная сварка – это технологический процесс получения неразъемного соединения металлических деталей при их местном нагреве протекающим в этих деталях электрическим током, сопровождаемым сдавливанием зоны соединения.

При прохождении тока тепло выделяется как на собственном сопротивлении деталей, так и на сопротивлении контакта между ними. Контактное сопротивление обычно составляет значительную часть общего сопротивления сварочной цепи. Поэтому на нем, выделяется основное количество тепла. Последующая пластическая деформация зоны сварки обеспечивает получение качественного соединения.

Контактная сварка начала применяться в 80^х годах прошлого столетия, когда русский изобретатель Бенардос запатентовал точечную сварку между угольными электродами с помощью простейших клещей. Им же была предложена роликовая сварка, а Томсоном (США) – стыковая.

Контактная сварка характеризуется большими скоростями нагрева металла в зоне сварки, для чего требуются машины большой электрической мощности (до 1000 кВа и более).

При сварке деталей большого сечения необходимое усилие сжатия может достигать нескольких сотен тонн. Поэтому механическая часть машин также должна быть мощной. Машина для контактной сварки состоит из следующих трех основных частей:

1. Источник питания. Чаще всего это сварочный трансформатор, понижающий напряжение сети до напряжения в несколько вольт (обычно 2 - 15 в.). Этого напряжения вследствие малости сопротивления сварочной цепи достаточно для создания во вторичной цепи больших токов (иногда до 100000 а и более).
2. Механическая часть служит для закрепления, перемещения и сжатия свариваемых деталей.
3. Аппаратура управления.

Способ контактной сварки характеризуется высокой стоимостью оборудования, высокой производительностью, легкостью механизации и автоматизации. В силу этих свойств контактная сварка применяется в основном в крупносерийном и массовом производстве:

В автомобилестроении (для приварки кузова автомобиля к каркасу, сварки ободов колес, бензобака и т. д.); вагоностроении (для приварки листовой обшивки к каркасу); при производстве инструмента (для сварки рабочей части из быстрорежущей стали с хвостовиком из обычной малоуглеродистой стали); при производстве труб и при сварке магистральных трубопроводов; сварка рельсовых стыков, стержней арматуры, звеньев цепей и т. д.

Классификация способов контактной сварки.

Существует несколько способов классификации:

1. По способу питания:

- а) переменным током.
- б) сварка с накоплением энергии.

В этом случае необходимая для сварки энергия сначала относительно медленно накапливается в электрическом поле конденсаторов или электромагнитном поле трансформатора, а затем отдается в зону сварки в виде короткого и мощного импульса.

- в) импульсом выпрямленного тока.
- г) сварка на низкочастотных машинах.

2. По форме сварного соединения:

- а) стыковая сварка
- б) точечная сварка
- в) рельефная сварка
- г) роликовая сварка
- д) роликово-стыковая сварка

3. По технологическим признакам

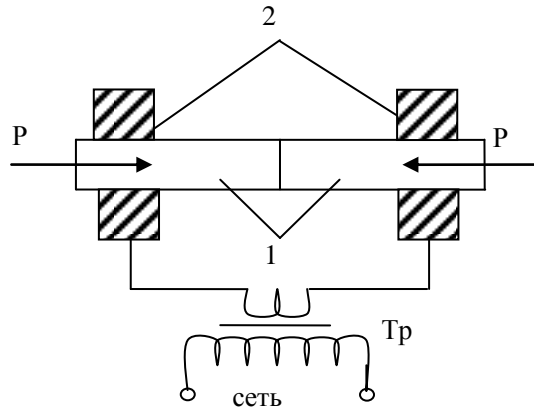
Например, стыковая сварка сопротивлением и оплавлением. Роликовая сварка – непрерывная, прерывистая и шаговая.

4. По способу подвода тока:

а) односторонняя

б) двусторонняя

Стыковая сварка – вид контактной сварки, при котором соединяемые детали свариваются по всей плоскости их касания



Свариваемые детали 1 зажимаются в электродах сварочной машины 2, которые с помощью гибких медных шин соединены с вторичным витком сварочного трансформатора Тр. Торцы деталей сжимаются осевым усилием Р.

Различают два основных способа стыковой сварки сопротивлением и оплавлением.

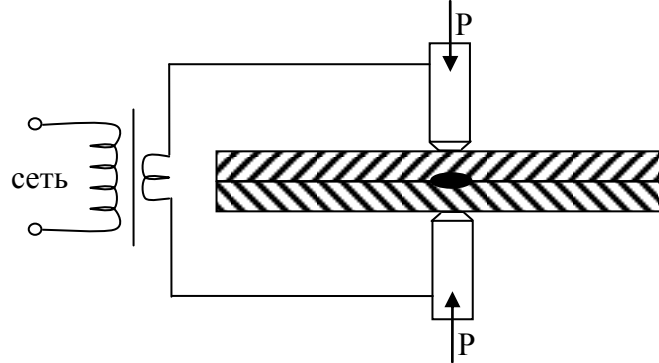
При сварке **сопротивлением** торцы деталей сжимаются осевым усилием Р, а затем включается сварочный трансформатор. Детали разогреваются током без расплавления, пластически деформируются и свариваются. Вследствие наличия контактного сопротивления температура по длине деталей распределяется неравномерно, она максимальна у торцов деталей и постепенно уменьшается к электродам.

При сварке **оплавлением** детали медленно сближают до соприкосновения торцов без заметного их сдавливания при включенном трансформаторе. При соприкосновении торцов деталей между ними образуется контакт. Сопротивление этого контакта, ввиду отсутствия сжимающих сил сравнительно велико. При протекании через этот контакт большого тока на нем выделяется большое количество тепла $Q=I^2Rt$.

Металл в зоне контакта быстро расплавляется, образуя между торцами деталей жидкую перемычку. При дальнейшем нагреве током эти перемычки взрываются. Это приводит к выбрасыванию из зоны стыка частиц расплавленного металла и некоторому

укорочению деталей. При дальнейшем сближении деталей образуются и взрываются все новые и новые перемычки. Это приводит к интенсивному разогреву торцов деталей. После получения на торцах деталей тонкого слоя расплавленного металла и достаточного прогрева деталей по длине они сдавливаются осевой силой (осаживаются). При этом расплавленный металл выдавливается из стыка, а расположенный под ним чистый хорошо разогретый металл пластически деформируется и сваривается.

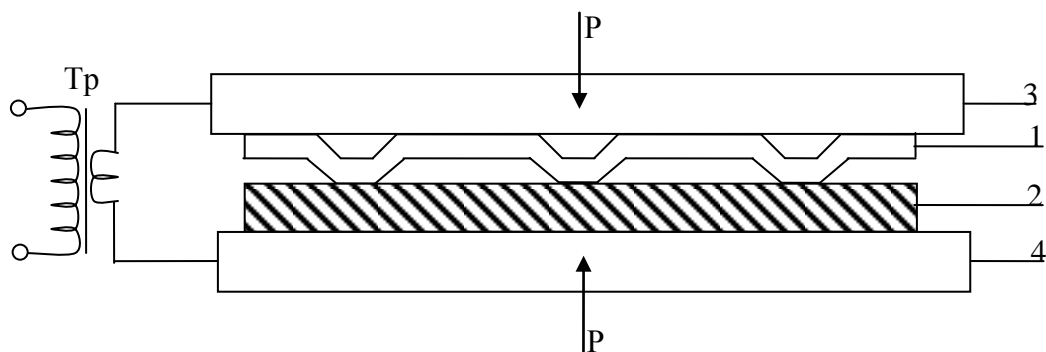
Точечная сварка – вид контактной сварки при котором соединяемые детали сваривают по поверхности их касания в отдельных точках (под электродами).



Электроды точечных машин обычно изготавливаются из меди и ее сплавов, которые обладают высокой электро и теплопроводностью. Вследствие этого детали в местах контакта с электродами разогреваются значительно медленнее, чем в зоне контакта между деталями.

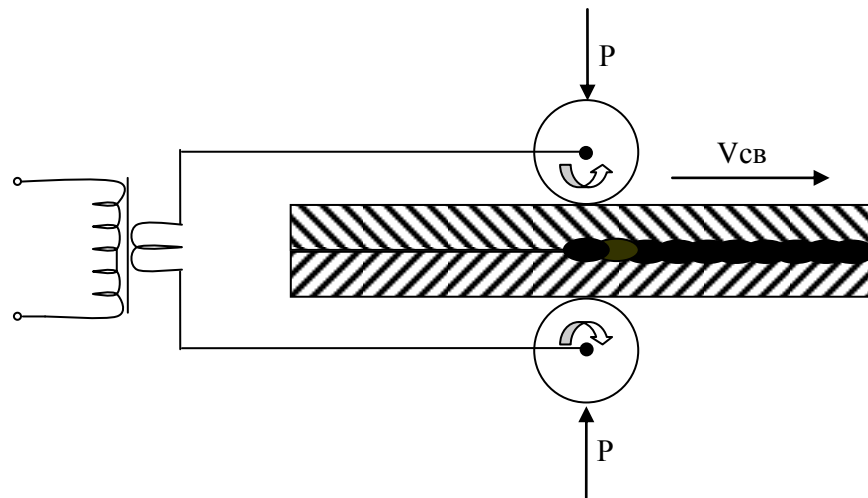
Процесс сварки обычно ведут до расплавления металла в центральной наиболее разогретой зоне. После остывания здесь образуется круглая сварная точка с литым ядром.

Рельефная сварка – это вид контактной сварки, при котором детали соединяются по части поверхности касания, ограниченной предварительно образованными выступами.



Свариваемые детали 1 и 2 сжимаются усилием P между контактными плитами 3 и 4, которые с помощью гибких медных шин соединены со вторичным витком сварочного трансформатора. До начала сварки детали плотно прилегают друг к другу в местах выступов. При включении тока детали здесь интенсивно нагреваются и свариваются с расплющиванием выступов. После сварки детали плотно прилегают друг к другу по всей поверхности.

Роликовая сварка – вид контактной сварки, при котором между свариваемыми деталями образуется непрерывный шов путем постановки последовательного ряда частично перекрывающихся точек.



Различают 3 вида роликовой сварки:

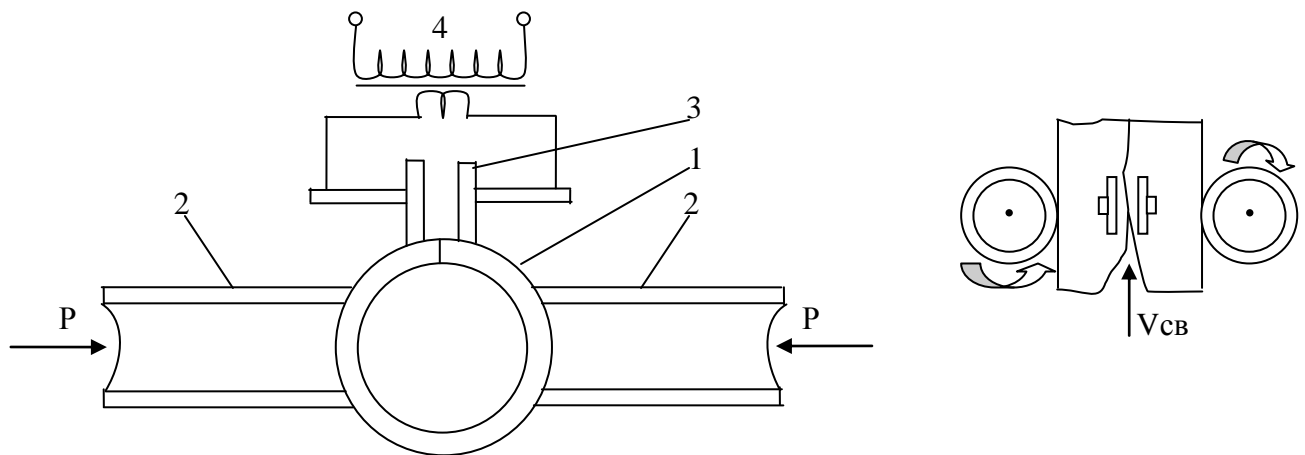
1. непрерывная;
2. прерывистая;
3. шаговая;

Непрерывная роликовая сварка – детали непрерывно перемещаются при постоянно включенном сварочном трансформаторе. Ее применение ограничено из-за перегрева зоны сварки и интенсивного износа роликов.

Прерывистая роликовая сварка – детали непрерывно перемещаются, а ток включается импульсами (обычно короче 0,25 сек.), чередующимися с такими же или более длительными паузами. Это наиболее распространенный вид роликовой сварки.

Шаговая сварка – детали перемещаются прерывисто, а сварочный ток включается в моменты остановки.

Роликостыковая сварка – разновидность роликовой сварки, при которой непрерывный шов образуется между кромками листов соединяемых встык. Она применяется в основном в производстве труб.



Заготовка трубы 1, сформированная в специальной машине, зажимается между роликами 2, сдавливающими усилием P кромки заготовки в месте стыка. Заготовка перемещается со скоростью $V_{св}$ под электродами 3 соединенными со сварочным трансформатором 4. При этом ее кромки нагреваются пластически деформируются усилием P и свариваются, образуя непрерывный прочноплотный шов.

Раздел 1. Общие особенности процессов при контактной сварке.

Электрическое сопротивление и нагрев при контактной сварке.

Закон Джоуля и удельное электрическое сопротивление.

Для получения качественного соединения при контактной сварке, необходимо нагреть детали в зоне соединения до температуры сварки, а также обеспечить прогрев деталей в достаточно широкой околошовной зоне для того, чтобы осуществить требуемую пластическую деформацию. Поэтому тепловое состояние деталей, характеризуемое температурным полем оказывает очень большое влияние на процессы контактной сварки.

Температурное поле – это совокупность температур во всех точках свариваемого изделия в определенный момент времени.

Температурное поле определяется процессом выделения тепла и процессом его распространений.

Количество тепла, выделяемое в проводнике с активным сопротивлением R при протекании в нем электрического тока I в течении времени t определяется по закону Ленца-Джоуля:

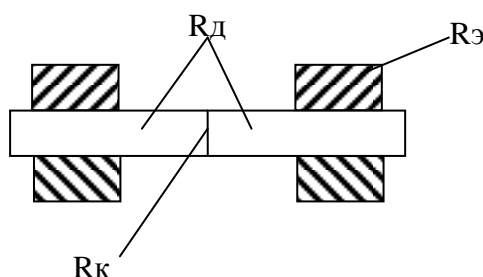
$$Q = \int_0^t R(t) I^2(t) dt, \text{ Дж} \quad (1)$$

Интенсивность тепловыделения характеризуется мгновенной мощностью:

$$q(t) = I^2(t) R(t), \text{ Дж/сек} \quad (2)$$

Величина сопротивления R и его распределение в зоне сварки существенно влияют на условия нагрева и температурное поле.

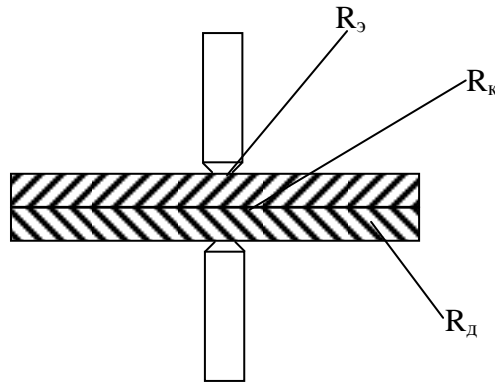
Сопротивление зоны сварки R складывается из сопротивления деталей R_d , сопротивления контакта между деталями R_k и сопротивления контакта электрод-деталь $R_э$.



При стыковой сварке $R_{\Sigma} \approx 0$ вследствие большой площади контакта между электродом и деталью. Тогда

$$Q = \int_0^t [R_k + 2R_d] I^2 dt \quad (3)$$

При точечной сварке



$$Q = \int_0^t [R_k + 2R_{\Sigma} + 2R_d] I^2 dt \quad (4)$$

1. Сопротивление деталей в общем случае определяется по формуле:

$$R = \rho \frac{l}{F} \quad (5)$$

где ρ - удельное сопротивление материала деталей;

l – длина, а F – площадь поперечного сечения участка деталей по которому протекает сварочный ток.

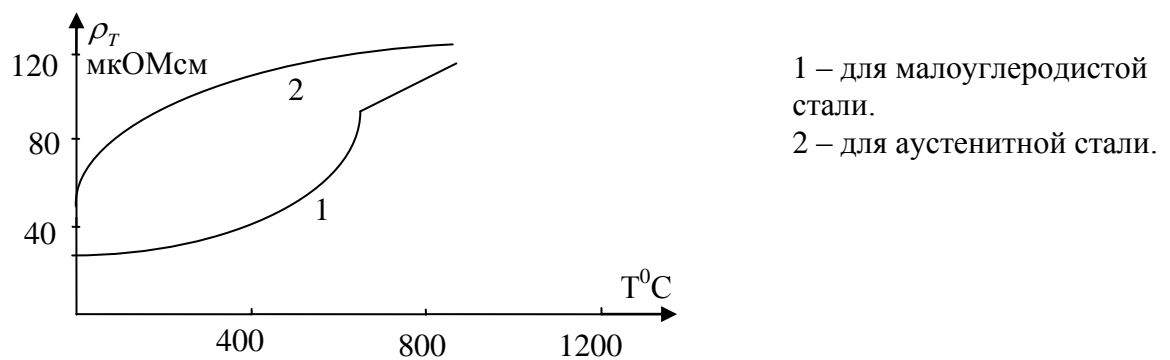
Собственные сопротивления свариваемых деталей пропорционально удельному сопротивлению, с увеличением которого обычно растет и контактное сопротивление. Поэтому удельное сопротивление – важнейшая характеристика материала при контактной сварке. С его увеличением по закону Ленца-Джоуля уменьшается ток необходимый для сварочного нагрева. Материалы с высоким удельным сопротивлением, в частности стали, свариваются на машинах относительно малой мощности и, наоборот для сварки материалов с низким сопротивлением (медные и алюминиевые сплавы) обычно требуются мощные машины удельное сопротивление зависит от температуры

$$\rho_T = \rho_0 (1 + \alpha T) \quad (6)$$

где ρ_0 - удельное сопротивление при $T=0^\circ\text{C}$

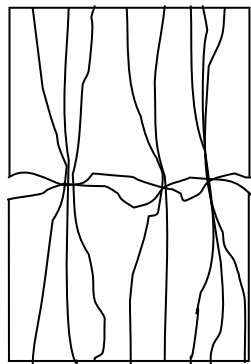
α - температурный коэффициент сопротивления.

Зависимость ρ_T от T для стали имеет вид:



2. Сопротивление контакта

Наличие контактного сопротивления между деталями обусловлено следующими причинами:



1) резкое уменьшение сечения проводника вблизи неровную поверхность и при сжатии соприкасаются не по всей плоскости, а по отдельным небольшим контактными площадкам, через которые и протекает ток.

2) наличие на поверхности контактирующих деталей окисных пленок, окалины, ржавчины, всевозможных загрязнений и т. д.

Контактное сопротивление сильно зависит от чистоты поверхности. Детали в местах контакта должны быть очищены от окалины и ржавчины и обезжирены.

Контактное сопротивление деталей уменьшается с ростом усилия сжатия P , что объясняется увеличением площади истинного контакта между ними из-за смятия поверхности выступов.

$$R_k = \frac{r_k}{p^\alpha} \quad (7)$$

где r_k – контактное сопротивление при $P=1$ кг

α лежит в пределах 0,5–1 для различных материалов (0,65–0,75 для стали); 0,75–0,85 для алюминиевых сплавов).

Величина r_k зависит от свойств материала и состояния его поверхности; она обычно уменьшается с уменьшением твердости и с увеличением электропроводности материала. (Для хорошо очищенной нашлифованной малоуглеродистой стали и алюминиевых сплавов r_k соответственно изменяется в пределах 0,005 – 0,006 и 0,001 – 0,002).

Сопротивление контакта между электродом и свариваемой деталью определяется зависимостью:

$$R_{\Sigma} \leq 0,5(R_M + R_K)$$

где R_K – сопротивление контакта между деталями из материала изделия

R_M – сопротивление контакта между двумя деталями из электродного материала.

Так как электроды изготавливают из меди и ее сплавов, а сопротивление контакта между медными деталями очень мало, то величиной R_M можно пренебречь. Тогда

$$R_{\Sigma} \leq 0,5R_K \quad (8)$$

Сопротивление контакта очень сильно изменяется при нагреве в результате роста удельного сопротивления слоя металла, прилегающего к контакту; снижения сопротивления окисной пленки и увеличении числа и площади истинных контактов между деталями благодаря пластической деформации нагретого металла. В условиях контактной сварки два последних фактора имеют главное значение: с повышением температуры контактное сопротивление быстро падает и практически исчезает, у стали при 600°C , у алюминиевых сплавов при 350°C .

При стыковой сварке оплавлением контакт между деталями осуществляется через жидкие перемишки расплавленного металла. Сопротивление контакта зависит от площади сечения и количества одновременно существующих перемишек. Так как перемишки при сварке оплавлением все время возникают и разрушаются, то сопротивление контакта непрерывно изменяется. Средняя величина сопротивления контакта приблизительно определяется по следующей эмпирической формуле

$$R_{\text{опл}} = \frac{9500K_1}{F^{\frac{2}{3}}V_{\text{опл}}^{\frac{1}{3}}j} \quad (9)$$

где: F – сечение свариваемых деталей в см^2

$V_{\text{опл}}$ – скорость оплавления (скорость сближения деталей при оплавлении)

j – плотность тока в а/мм^2

K_1 – коэффициент, зависящий от материала (для стали $K_1=1,0-1,1$)

Эффективное сопротивление контакта при оплавлении относительно велико (обычно 100-1500 мкОм для стали).

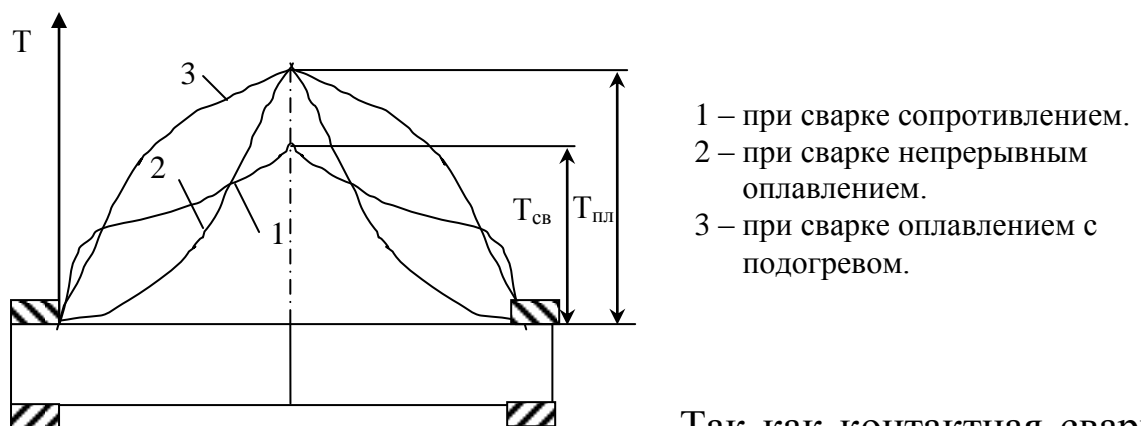
Сопротивление при стыковой сварке.

При стыковой сварке нагрев зоны соединения в соответствии с формулой (3) определяется контактным сопротивлением между торцами деталей и собственным сопротивлением их концов, выступающих из зажимов.

При сварке сопротивлением, когда торцы деталей все время сжаты достаточно большим усилием, контактное сопротивление относительно мало и быстро исчезнет при нагреве. Среднее контактное сопротивление при сварке оплавлением велико и примерно постоянно в течение всего времени оплавления.

Сопротивление выступающих концов деталей определяется по формуле (5). Оно минимально при холодных деталях и растет по мере их нагрева.

Величина и характер изменения сопротивления зоны сварки определяется распределением температуры в деталях, которые к концу нагрева при различных способах стыковой сварки имеет вид:



Так как контактная сварка обычно ведется на переменном токе, то сопротивление деталей несколько увеличивается из-за наличия поверхностного эффекта.

Поверхностный эффект заключается в преимущественном протекании переменного тока по поверхности проводника.

Переменный ток взаимодействует с создаваемым им магнитным полем и оттесняется к поверхности проводника. При этом уменьшается эффективная площадь сечения проводника и, следовательно, возрастает его сопротивление.

Поэтому при переменном токе активное сопротивление проводника увеличивается по сравнению с его сопротивлением при постоянном токе.

Влияние поверхностного эффекта на сопротивление проводника характеризуется коэффициентом поверхностного эффекта:

$$m = \frac{R_{\approx}}{R_{=}} > 1 \quad (10)$$

$R_{=}$ - сопротивление проводника при постоянном токе.

R_{\approx} - сопротивление проводника при переменном токе.

Коэффициент поверхностного эффекта зависит от свойств материала проводника, плотности тока и его частоты.

Коэффициент m определяется по формулам:

$$m = 1 + E^4/3, \text{ при } E < 1$$

и (10a)

$$m = E + 0,25 + 3/64E, \text{ при } E > 1$$

здесь

$$E = \frac{a_0}{2} \sqrt{\frac{1,256\pi f \mu 10^{-8}}{\rho}} \quad (10б)$$

где: a_0 – радиус круглого проводника в см.

f – частота переменного тока в Гц.

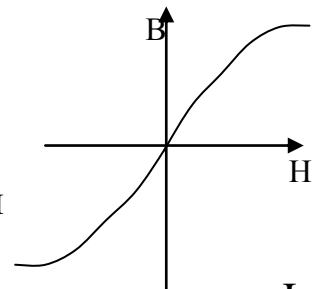
ρ - удельное сопротивление проводника в Омсм

μ - относительная магнитная проницаемость проводника

$$\mu = B/H \quad (10в)$$

где B – индукция в гс

H – напряженность магнитного поля в а/см



У поверхности круглого проводника при токе I напряженность поля равна:

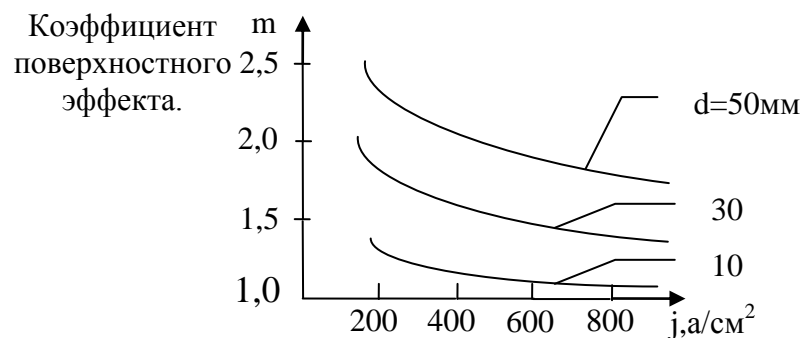
$$H = 0,2I/a_0 \quad (10г)$$

Из соотношений (10-10г) следует:

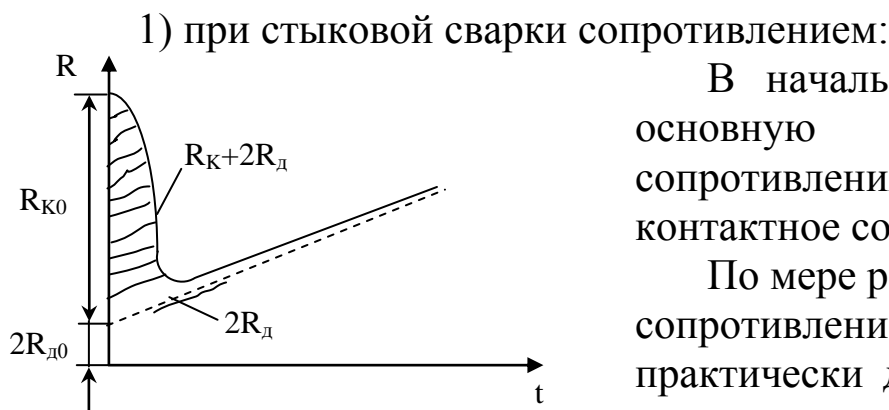
Интенсивность проявления поверхностного эффекта возрастает при увеличении радиуса деталей, при уменьшении удельного сопротивления материала, при уменьшении плотности тока и при увеличении частоты переменного тока.

При стыковой сварке плотность тока обычно велика и поэтому при малом радиусе свариваемых

деталей поверхностный эффект проявляется слабо. На практике его необходимо учитывать только при диаметре деталей более 20-25 мм.



В процессе сварки полное сопротивление зоны соединения изменяется с течением времени следующим образом:

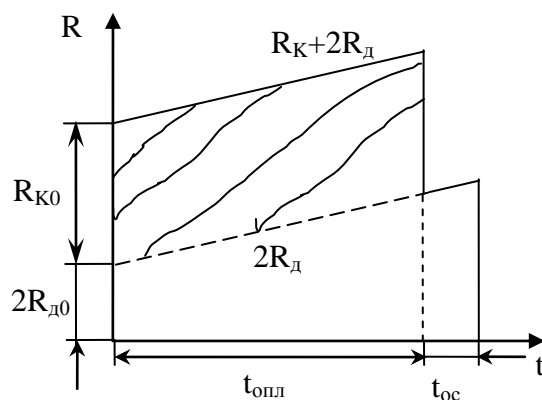


В начальный момент сварки основную долю общего сопротивления составляет контактное сопротивление.

По мере разогрева контакта его сопротивление резко уменьшается, практически до нуля, и основную роль начинает играть сопротивление деталей,

которое постепенно возрастает вследствие увеличения удельного сопротивления ρ_T при нагреве.

2) при стыковой сварке оплавлением:

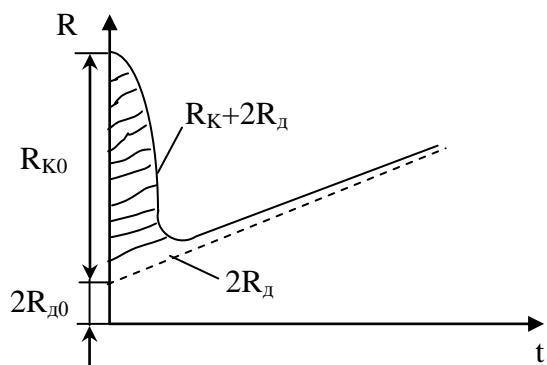


В процессе оплавления основную роль играет контактное сопротивление, которое при оплавлении с постоянной скоростью остается примерно постоянной. При осадке контактное сопротивление резко падает практически до нуля и сопротивление зоны сварки

становится равным сопротивлению деталей.

Сопротивление при точечной сварке.

В процессе точечной сварки сопротивление зоны сварки изменяется следующим образом:



В начальный момент сварки основную роль играет контактное сопротивление, которое резко падает практически до нуля при нагреве. В дальнейшем сопротивление зоны сварки определяется в основном сопротивлением деталей, которое растет с повышением температуры.

Некоторое уменьшение сопротивления деталей в конце процесса сварки можно объяснить вдавливанием электродов в детали.

При точечной сварке переменным током (как и при стыковой) сопротивление деталей несколько выше из-за поверхностного эффекта. Вследствие большой плотности тока это повышение незначительно и им можно пренебречь.

При сварке деталей из магнитных материалов возможно дополнительное увеличение сопротивления сварочной цепи вследствие индуктирования в деталях вихревых токов.

Общая характеристика нагрева при контактной сварке.

При контактной сварке нагрев деталей осуществляется благодаря выделению тепла на контактном собственном сопротивлении деталей, током, протекающим в направлении перпендикулярном плоскости соединения. Если предположить, что величина тока в процессе сварки не изменяется, то формула (1) примет вид:

$$Q = I^2 \int_0^t R(t) dt \quad (11)$$

Несмотря на то, что вначале процесса сварки контактное сопротивление составляет основную долю общего сопротивления зоны сварки, роль его в тепловом балансе обычно не велика.

Общее количество тепла выделяется в зоне сварки, согласно формуле (11) пропорционально площади под кривой $R_K(t)+2R_d(t)$ (рис.).

Количество тепла, выделяемое на контактном сопротивлении пропорционально площади под кривой $R_K(t)$ (заштрихованная часть на рис.).

А количество тепла, выделяемое на сопротивление деталей, пропорционально площади под кривой $2R_d(t)$.

При всех способах контактной сварки, кроме стыковой сварки оплавлением, контактное сопротивление после начала сварки резко падает и доля тепла, выделяемого на контактном сопротивлении, обычно не превышает 10%.

Однако в начальный момент сварки на контакте выделяется большое количество тепла. Металл в зоне непосредственно прилегающей к контакту быстро разогревается, и сопротивление этого участка быстро повышается (вследствие увеличения ρ_i). Поэтому при дальнейшем протекании тока здесь создается участок интенсивного тепловыделения, т.е. местный концентратор тепловыделения. Вследствие этого наиболее интенсивно разогревается металл именно в зоне контакта.

Тепло, выделяемое при сварке, расходуется на полезный нагрев деталей непосредственно в зоне сварки и на компенсацию потерь в электроды, в окружающий зону сварки металл деталей и в окружающее пространство:

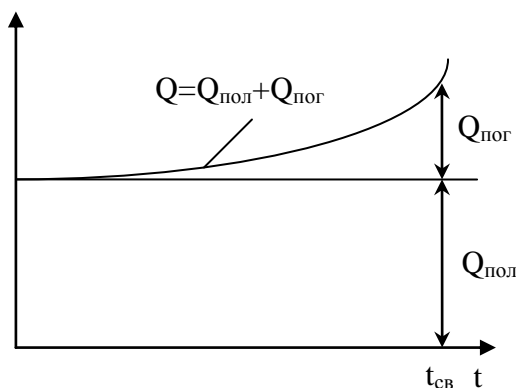
$$Q=Q_{\text{пол.}}+Q_{\text{пот.}} \quad (12)$$

Полезное количество тепла, т.е. то тепло, которое необходимо для нагрева объема V материала деталей с теплоемкостью C и плотностью γ до температуры $T_{\text{св}}$ равно:

$$Q_{\text{пол.}}=C\gamma V T_{\text{св}} \quad (13)$$

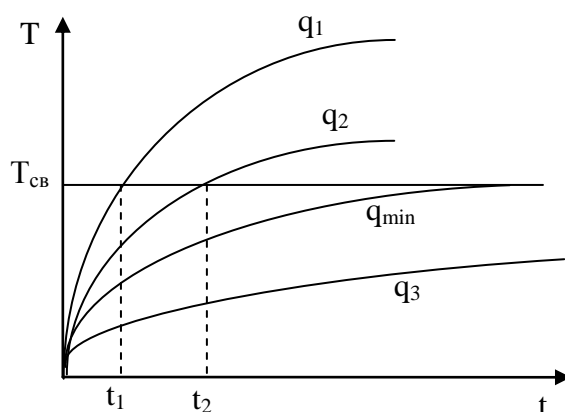
$Q_{\text{пол.}}$ от времени нагрева не зависит.

Потери же тепла всегда возрастают при увеличении времени нагрева $t_{\text{св}}$.



Поэтому общее количество тепла Q , необходимое для осуществления сварки, также растет с увеличением времени $t_{св}$.

Скорость нагрева деталей при сварке зависит от мощности машины:



$$q_1 > q_2 > q_{\min} > q_3$$

$$t_1 < t_2$$

При большой электрической мощности машины q_1 нагрев зоны сварки до необходимой температуры $T_{св}$ происходит очень быстро. При уменьшении мощности машины нагрев происходит медленнее. При определенной мощности, равной q_{\min} нагрев до необходимой температуры $T_{св}$ происходит за время теоретически равной бесконечности.

При мощности меньше q_{\min} (например, q_3) нагрев до необходимости $T_{св}$ вообще не возможен.

Следовательно, электрическая мощность машины для сварки данных деталей может быть различной, но обязательно больше q_{\min} .

Современная технология контактной сварки характеризуется использованием машин большой мощности, так как при этом, во-первых, уменьшается продолжительность процесса и, как следствие, растет его производительность и, во-вторых, уменьшается расход электроэнергии вследствие уменьшения потерь тепла.

Свариваемость различных металлов и сплавов контактной сваркой.

Основные процессы в зоне сварки.

Механические свойства металла в зоне сварки отличаются от свойств основного металла вследствие изменения хим. состава, микро и макроструктуры. Эти изменения определяются термическим циклом сварки, пластической деформацией и взаимодействием с окружающей средой. При сварке в замкнутом объеме (роликовая и точечная сварка) зона сварки практически изолирована от окружающей среды, поэтому хим. состав металла не изменяется.

При сварке в незамкнутом объеме (стыковая сварка) изменение хим. состава происходит по следующим причинам:

- 1) В результате взаимодействия с кислородом и азотом воздуха (основное значение имеют процессы окисления т.к. при относительно низких температурах зоны сварки, характерных для контактной сварки, азот почти не диссоциирован, а, находясь в молекулярном состоянии, мало активен).
- 2) Испарение элементов с относительно низкой температурой кипения (например, цинка, кипящего при 907° , из латуни, магния, кипящего при 1107° , алюминий-магниевых сплавов).
- 3) Удаление из зоны сварки при осадке относительно легкоплавкого расплава, богатого легирующими элементами и примесями (например, при стыковой сварке оплавлением стали в стыке понижается содержание серы и углерода, удаляемых с расплавленным металлом).

Наибольшее практическое значение имеют процессы окисления. Продукты реакции окисления при температуре сварки могут находиться в газообразном, жидком или твердом состоянии.

Жидкие и газообразные окислы обычно легко удаляются из стыка при осадке. При этом несколько снижается содержание в стали углерода ($\text{CO}\uparrow$).

Наибольшую опасность представляют собой твердые

окислы температура плавления которых выше температуры плавления основного металла (Al_2O_3 $T_{\text{пл}}=2050^\circ$, Cr_2O_3 $T_{\text{пл}}=1890^\circ$, SiO_2 $T_{\text{пл}}=1710^\circ$). Эти окислы, оставаясь в зоне соединения, сильно ухудшают ее механические свойства.

Процесс окисления в своей основе является диффузионным. В начальный момент образования окисления пленки происходит мгновенно путем прямой адсорбции к поверхности металла ионов кислорода. После образования окисной пленки толщиной в несколько атомных слоев положительные ионы железа и других элементов диффундируют через эту пленку и соединяются с ионами кислорода. Чем меньше ионный радиус элемента, тем больше его относительное содержание в окисной пленке по сравнению с содержанием в основном металле. Ионный радиус железа $0,75\text{\AA}$. Ионные радиусы хрома ($0,65\text{\AA}$), алюминия ($0,5\text{\AA}$) и кремния ($0,41\text{\AA}$) значительно меньше, чем железа. Поэтому их относительное содержание в окислах намного больше, чем в стали. Например, при содержании в стали 13% хрома его содержание в окислах достигает 56%. Достаточно 6% Al в стали, чтобы образующаяся на ней окалина, содержала 53% Al и представляло собой практически чистую двуокись алюминия Al_2O_3 .

Структура зоны сварки определяется условиями ее нагрева и пластической деформации.

Рассмотрим три основных случая:

- 1) Сварка с расплавлением в замкнутом объеме (точечная и роликовая сварка).

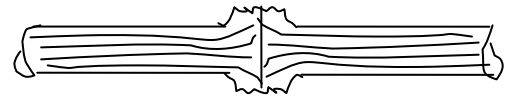
При этом образуется ядро литого металла с характерной столбчатой структурой. При кристаллизации вследствие несвободной усадки металла возможно образование литейных дефектов – усадочной рыхлости и раковин. Давление электродов, если оно достаточно велико, вызывает пластическую деформацию в кристаллизующемся ядре и уплотняет его.

Большие усадочные напряжения, возникающие при кристаллизации в замкнутом объеме, могут приводить к образованию горячих трещин.

Как правило, однофазные сплавы с большим температурным интервалом кристаллизации обладают повышенной склонностью к образованию горячих трещин. Например, чисто аустенитные стали (X23H18) часто дают горячие трещины при точечной сварке. Повышенное содержание серы и углерода в стали, расширяющее интервал кристаллизации, способствует образованию горячих трещин. Обжатие металла в ядре при кристаллизации уменьшает растягивающие напряжения и может предупредить появление трещин.

2) Сварка с расплавлением в незамкнутом объеме (стыковая сварка оплавлением).

Взаимодействие расплавленного металла с кислородом воздуха приводит к образованию окислов, которые при осадке не всегда могут быть полностью удалены из стыка. Наличие окислов в стыке снижает прочность и пластичность соединения. Значительная пластическая деформация обычно предупреждает образование литейных пороков в стыке. Пластическая деформация вызывает заметное искривление волокон, в результате чего в стыке металл иногда работает не вдоль, а поперек волокон. Это может понижать механические свойства сварного соединения и в первую очередь его пластичность.



3) Сварка без расплавления в незамкнутом объеме (стыковая сварка сопротивлением).

При медленном нагреве до температуры $1200 - 1300^{\circ}$ происходит интенсивный рост зерна. При быстром нагреве до температур ниже температуры интенсивного роста зерна (для стали около 1100°) структурные изменения в металле стыка практически не происходят. Увеличение пластических деформаций снижает конечный размер зерна. Окислы, остающиеся в стыке, снижают его прочность и особенно пластичность.

Свариваемость различных металлов контактной сваркой.

1. Малоуглеродистые и низколегированные стали.

Малоуглеродистые стали с содержанием углерода 0,08-0,16% хорошо свариваются всеми видами контактной сварки.

Этому способствует следующие факторы:

- а). сравнительно большое удельное электрическое сопротивление (в 8-10 раз выше, чем у меди);
- б) малое сопротивление пластической деформации в широком интервале температур.
- в). малая склонность к закаливанию (отсутствует охрупчивание в сварном соединении);
- г). узкий температурный интервал кристаллизации и вследствие этого малая склонность к образованию горячих трещин;
- д) отсутствие элементов, дающие тугоплавкие окислы.

При сварке холоднокатаных сталей возможно некоторое ее разупрочнение в околошовной зоне, практически не устранимое никаким способом. Для уменьшения степени разупрочнения холоднокатаные стали должны свариваться с минимальной зоной разогрева, то есть при быстром нагреве и охлаждении.

Сталь в околошовной зоне всегда нагревается на некотором участке выше температуры начала интенсивного роста зерна. Чем медленнее нагрев и охлаждение, тем шире этот участок, и тем крупнее получаемое зерно. При большой скорости нагрева ($150^{\circ}/\text{сек}$ и выше) температура окончания перекристаллизации стали повышается до температуры $\alpha-\gamma$ превращения железа (910°), а температура начала интенсивного роста зерна растет на $150-200^{\circ}$ по сравнению с этой температурой при медленном нагреве. Однако даже при больших скоростях нагрев полностью избежать роста зерна в зоне, даже кратковременно нагретой выше $1150-1200^{\circ}$ нельзя. Обычно нагрев в течение более 3-4 секунд уже ведет к заметному росту зерна. В наибольшей степени рост зерна проявляется при относительно медленной стыковой сварки деталей большого сечения. Рост зерна часто сопровождается видманшtedтовой структурой, при которой избыточный феррит выделяется в остывающей стали не в виде сетки по границам зерен аустенита, а внутри этих зерен параллельными пластинками. Видманшtedтова структура может понизить пластичность сварного

соединения. Она легко устраняется термической обработкой с перекристаллизацией (нормализацией или отжигом).

Влияние углерода и легирующих элементов на условия контактной сварки проявляется в следующем:

- а) увеличение содержания углерода уменьшает опасность окисления. Добавки C_r , A_l , S_i приводят к образованию тугоплавких окислов, что затрудняет сварку.
- б) увеличение содержания углерода резко расширяет температурный интервал кристаллизации (с 50^0 при 0,2%С до 200^0 при 1,25%С) и способствует появлению усадочных дефектов и горячих трещин. Легирующие элементы в количестве вводимых в низколегированные стали мало влияют на эту характеристики.
- в) с увеличением содержания в стали углерода и легирующих элементов, как правило, возрастает сопротивление пластической деформации. Поэтому при сварке низколегированных сталей для достижения требуемой пластической деформации необходимо более высокое удельное давление (на 10-100%), чем при сварке таких же деталей из малоуглеродистой стали.
- г) повышение содержания в стали углерода и легирующих элементов повышает ее удельное сопротивление, следовательно такие стали можно сваривать при меньших плотностях тока.

2. Аустенитные стали

Аустенитные стали обладают многими ценными свойствами: высокой коррозионной стойкостью, жаропрочностью (прочностью в условиях длительной работы при высоких температурах) и жаростойкостью (малой скоростью окисления при значительном нагреве). Наиболее распространена хромоникелевая аустенитная сталь с содержанием 17-19% хрома и 8-10% никеля, иногда дополнительно легированная молибденом, кремнием, титаном, ниобием и другими элементами, повышающими ее коррозионную стойкость и жаропрочность. Применяются стали с большим содержанием никеля и хрома (25% C_r и 20% N_i) и еще более легированные.

Контактная сварка аустенитных сталей определяется следующими особенностями этих сталей:

- а) их сопротивление пластической деформации при высоких температурах значительно выше, чем у малоуглеродистых и низколегированных сталей, поэтому при контактной сварке аустенитных сталей требуются большие удельные давления.
- б) аустенитные стали обладают высоким удельным электрическим сопротивлением и малой теплопроводностью, поэтому их можно сваривать при меньших токах, чем малоуглеродистые стали.
- в) холоднокатаные аустенитные стали при сварке разупрочняется в околошовной зоне. Для уменьшения разупрочнения их желательно сваривать на “жестких” режимах (“жестких” режимы характеризуются быстрым нагревом, “мягкие” – относительно медленным).

Однако, сварка некоторых аустенитных сталей, склонных к горячим трещинам (например, Х25Н20), целесообразнее на мягких режимах. Мягкие режимы иногда применяют, также из-за высокой жаропрочности стали, затрудняющей ее пластическую деформацию при малой зоне разогрева, характерной для сварки на жестких режимах.

- г) аустенитные стали дают тугоплавкие окисные пленки (Cr_2O_3), поэтому стыковая сварка таких сталей затруднена.
- д) аустенитные стали обладают высоким коэффициентом теплового расширения, что позволяет ожидать больших сварочных деформаций. Однако, при контактной сварке этих сталей из-за низкой теплопроводности зона разогрева мала и деформации невелики.

3. Алюминий и его сплавы.

Чистый алюминий обладает высокой тепло и электропроводностью (62% проводимости меди). Контактная сварка Al применяется редко, так как возможна только при очень больших токах и связана с быстрым износом электродов.

В промышленности широко применяются контактная сварка (особенно роликовая и точечная) высокопрочных алюминиевых сплавов, таких как $\text{AM}_{\text{ц}}$ (1-1,6% M_{n} , до 1% F_{e} , до 1% S_{i}), $\text{AM}_{\text{г}}$ (2-2,8% Mg , 0,15-0,4% M_{n}), дуралюмин (Д16 содержит 3,6-4,7% C_{u} , 1,75% Mg и 0,3-0,9% M_{n}).

Поведение алюминиевых сплавов при контактной сварке и ее режимы определяются следующими особенностями этих сплавов:

- а) Алюминиевые сплавы при нагреве разупрочняются и поэтому их желательно сваривать с минимальной зоной разогрева, используя жесткие режимы.
- б) Алюминиевые сплавы обладают высокой электро и теплопроводностью, поэтому для их сварки требуются значительные токи (необходимы машины большой мощности)
- в) Высокопрочные алюминиевые сплавы, как правило, кристаллизуются в широком интервале температур ($90-135^{\circ}$ и более) и часто склонны к образованию горячих трещин, для борьбы с которыми необходимо применять значительные усилия сжатия в процессе кристаллизации расплавленных зон свариваемых соединений.
- г) Алюминий и его сплавы имеют высокий коэффициент теплового расширения (почти вдвое больший, чем у малоуглеродистых сталей), что способствует увеличению сварочных деформаций. Для облегчения борьбы с деформациями необходимо применять жесткие режимы с минимальной зоной разогрева.
- д) При стыковой сварке алюминиевых сплавов особое значение имеет окисление нагреваемых поверхностей (образование тугоплавкой окисной пленки Al_2O_3). Поэтому стыковая сварка должна сопровождаться очень большой пластической деформацией в стыке, достаточной для разрушения окисных пленок.

4. Медь и ее сплавы.

Контактная сварка меди затруднена ее исключительно высокой электро и теплопроводностью. Практически применяется только ее стыковая сварка сопротивлением, постепенно вытесняемая холодной сваркой.

Значительно лучше свариваются контактной сваркой некоторые бронзы (кремнистая, фосфористая, бериллиевая и др.) и латуни с содержанием 30-38% Zn .

Хорошо свариваются медноникелевые сплавы.

5. Никель и его сплавы.

Чистый никель по своим физическим и электрическим свойствам близок к железу и хорошо сваривается всеми видами контактной сварки.

Жаропрочные сплавы на никелевой основе (например, нихром ХН78Т ($\approx 20\%C_T$; $0,15\%T_i$ и более $75\%N$)) обладают очень высоким удельным сопротивлением и малой теплопроводностью, поэтому при их контактной сварке требуется относительно небольшой ток.

Вследствие высокой жаропрочности при сварке этих сплавов необходимы большие удельные давления.

Во избежание разупрочнения сплава в зоне сварки и больших сварочных деформаций, связанных с высоким коэффициентом теплового расширения обычно применяют жесткие режимы.

6. Титан и его сплавы.

Титан и его сплавы отличаются высокой химической активностью. При нагреве с доступом воздуха титан легко окисляется. При нагреве до 800^0 начинается электрическая реакция титана с азотом с образованием нитридов T_iN . Титан активно растворяет водород. Поэтому стыковую сварку титана и его сплавов желательно проводить в среде нейтрального газа (аргона).

Точечная и роликовая сварка титана и его сплавов дает вполне удовлетворительные результаты.

По своим физическим и механическим свойствам, а также электропроводности титан близок к аустенитной стали. Он сваривается при умеренных токах и относительно большом давлении.

Раздел 2. Технология различных способов контактной сварки.

Стыковая сварка.

Применяется:

1. Для получения из проката длинных заготовок или изделий, например, сварка стыков труб, сварка рельсовых стыков, сварка концов проволоки при ее непрерывном волочении.
2. Сварка изделий замкнутой формы, например, ободов колес, звеньев цепей.
3. Для экономичного образования изделия сложной формы из простых штампованных деталей
4. Для экономии высоколегированной стали в инструментальной промышленности (рабочая часть инструмента из быстрорежущей стали, сваривается с хвостовиком из малоуглеродистой стали) и т. д.

Условиями получения качественного соединения при любой разновидности стыковой сварки являются:

1. Равномерный прогрев детали по сечению.
2. Защита зоны сварки от окисления или обеспечения удаления из стыка продуктов окисления.
3. Обеспечение равных условий нагрева и пластической деформации для обеих деталей.

1. Сварка сопротивлением.

При сварке сопротивлением указанные выше условия могут быть выполнены только при быстром нагреве плотно прижатых друг к другу деталей и значительной пластической деформации зоны соединения. В связи с этим сварка сопротивлением применяется только для деталей небольшого сечения (до 200 мм²).

Основными параметрами стыковой сварки являются:

Сварочный ток $I_{св}$, время сварки $t_{св}$, установочная длина (расстояние от торца деталей до токоподводящего зажима), усилие осадки $P_{ос}$, величина осадки.

Сварочный ток и длительность сварки связаны между собой. Для малоуглеродистых и низколегированных сталей плотность тока и время сварки связаны следующей зависимостью:

$$j \approx (12 - 15) + \frac{90 - 120}{t_{св}} (a / \text{мм}^2)$$

(время сварки обычно находится в пределах 0,5-10 сек.).

Установочная дина оказывает значительное влияние на условия нагрева и пластической деформации. При слишком малой установочной длине невозможно нагреть металл в зоне стыка до необходимой температуры вследствие интенсивного теплоотвода в электроды. При большой установочной длине возрастают непроизводительные затраты энергии на нагрев деталей вне зоны сварки. Кроме того, при осадки возможен изгиб деталей и смещение торцов.

Установочную длину выбирают по сечению деталей.

$$l_1 + l_2 = 1 - 1,2\sqrt{F} \quad (\text{для сталей})$$

При сварке разнородных материалов металл с большей теплопроводностью сваривается при большей установочной длине.

Усилие осадки должно обеспечивать необходимую пластическую деформацию. Удельное давление при сварке малоуглеродистых сталей выбирают в пределах:

$$P = 2-4 \text{ кг/мм}^2$$

При таком давлении и нагреве зоны сварки до температуры 1200-1300⁰ пластическая деформация составляет для F=20-100 мм² Δ=1,5-2 мм, F=100-500 мм² Δ=2-3 мм.

Укорочение деталей при пластической деформации компенсируется припуском на осадку (Δ_{ос}).

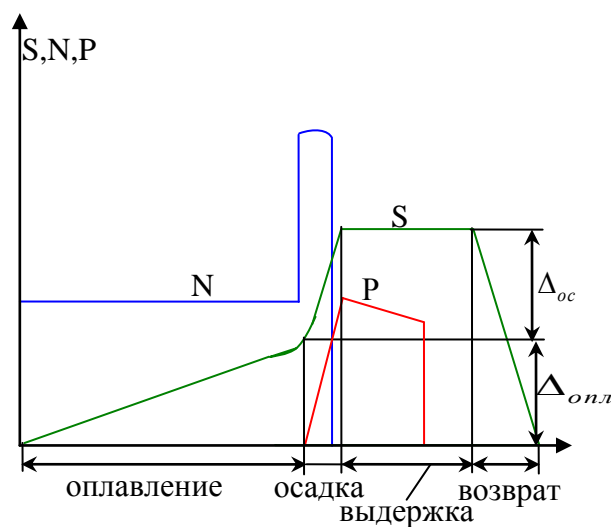
Детали сечением более 200-300мм² иногда сваривают сопротивлением в защитных газах, например в смеси азота с водородом, очищенной от кислорода.

Сварка оплавлением.

Сварка оплавлением является основным способом стыковой сварки.

Существует два способа стыковой сварки оплавлением: сварка непрерывным оплавлением и сварка оплавлением с предварительным подогревом.

Процесс сварки непрерывным оплавлением состоит из двух стадий оплавления и осадки.

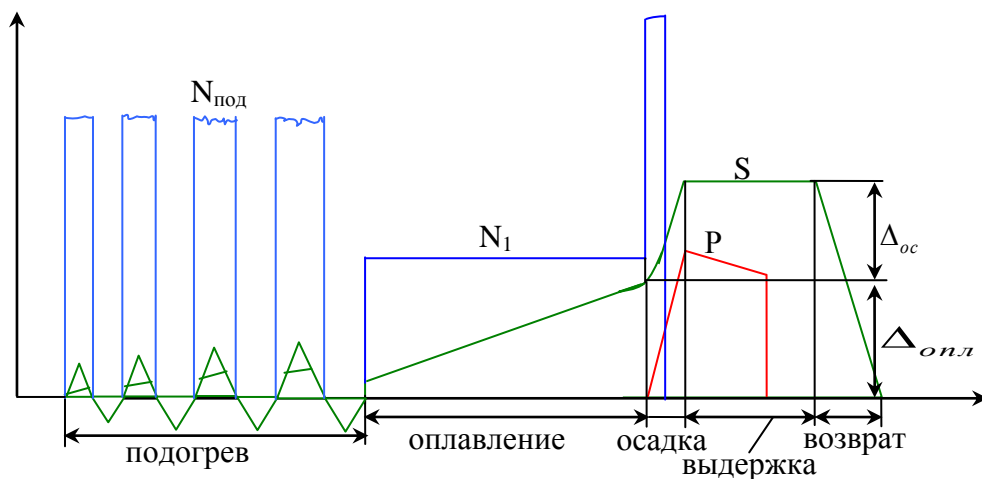


S – перемещение подвижной плиты машины;

N – мощность, выделяемая в стыке;

P – усилие сжатия деталей.

Сварка оплавлением с предварительным подогревом состоит из трех стадий: подогрева, оплавления и осадки.



Предварительный подогрев обычно осуществляется в самой машине путем пропускания через детали тока от сварочного трансформатора. Подогрев осуществляется при возвратно-поступательном перемещении подвижной плиты машины. При сближении деталей и их сжатии с усилием P сварочная цепь и через детали протекает ток, осуществляющий их нагрев. Наиболее интенсивно разогреваются торцы деталей. При обратном движении плиты цепь размыкается и происходит выравнивание температур в деталях вследствие теплопередачи от торцов вглубь деталей.

Обычно при подогреве короткие импульсы (0,5-2 сек.) чередуются с паузами примерно такой же продолжительности.

Процесс оплавления при обоих способа продолжается до получения на торцах деталей тонкого слоя расплавленного металла. При осадке этой загрязненный окислами металл вытесняется из стыка с образованием грота, а расположенный под ним чистый металл пластически деформируется и сваривается.

Для обеспечения достаточной пластической деформации детали должны быть хорошо прогреты по длине достаточно широкой околостыковой зоне. При сварке непрерывным оплавлением нагрев деталей осуществляется в основном путем теплопередачи от торцов, где происходит основное тепловыделение.

Предварительный подогрев способствует более равномерному прогреву деталей по длине и улучшению условий пластической деформации.

Основными параметрами режима стыковой сварки оплавлением являются:

- температура предварительного подогрева $T_{\text{под}}$,
- время подогрева $t_{\text{под}}$:
(длительность импульсов и пауз и их количества),
- скорость оплавления $V_{\text{опл}}$,
- припуск на оплавление $\Delta_{\text{опл}}$,
- ток оплавления $I_{\text{опл}}$,
- вторичное напряжение холостого хода U_{20} ,
- установочная длина l_1+l_2 ,
- припуск на осадку $\Delta_{\text{ос}}$,
- скорость осадки $V_{\text{ос}}$,
- усилия осадки $P_{\text{ос}}$.

Температура подогрева для стальных деталей среднего сечения составляет 700-900⁰С, а для большого сечения – 1100-1200⁰С.

Длительность подогрева растет с увеличением площади сечения и уменьшением мощности машины. Для деталей сечением 500мм² число импульсов подогрева при мощности 150кВА равно 4-6 общей длительностью 6 сек., а для деталей сечением 15000мм² при мощности 600-700кВА число импульсов доходит до 100 общей длительностью 150сек.

Скорость оплавления влияет на процесс следующим образом: с одной стороны увеличение скорости оплавления приводит к сужению зоны интенсивного разогрева, с другой стороны способствует более равномерному оплавлению торцов деталей по сечению, скорость оплавления зависит от температуры предварительного подогрева и растет пропорционально используемой мощности.

$$V = \frac{0,24I^2 R}{\gamma \cdot cF(T_0 - T_n)} \text{ мм/сек},$$

где С – удельная теплоемкость, кал/г.град; T₀, T_н – средняя температура деталей в момент окончания процесса оплавления вначале процесса (T₀ ≈ 2000⁰С); I²R – мощность, выделяемая в зоне сварки; F – площадь оплавляемых деталей, мм; γ - удельный вес, г/см³.

Скорость оплавления обычно выбирают в пределах 1-3 мм/сек. Часто скорость оплавления изменяют в процессе оплавления, вначале процесса V_{опл}=0,2-1мм/сек, а к концу процесса возрастает до 2-4 мм/сек, а при высокопроизводительных режимах до 4-6 мм/сек.

Средняя скорость оплавления деталей из малоуглеродистой стали составляет 1-2,5 мм/сек, а у легированных – 2,5-3,5 мм/сек и более.

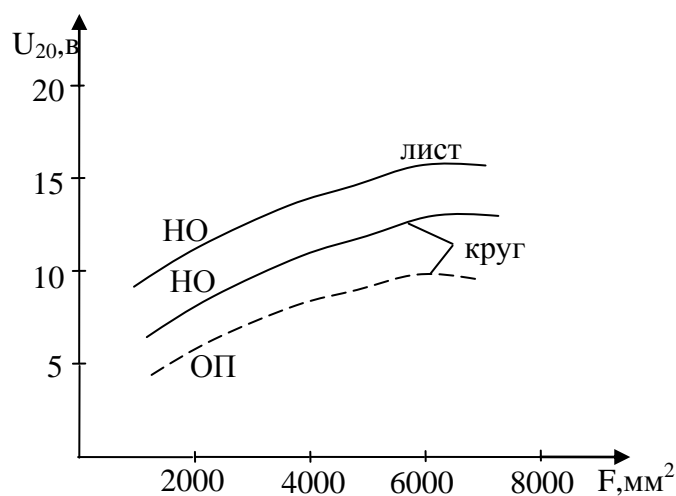
Припуск на оплавление выбирают таким, чтобы обеспечить на оплавление получение на торцах деталей слоя расплава и достаточный прогрев деталей в околостыковой зоне Δ_{опл} зависит от сечения деталей. При сварке с подогревом Δ_{опл} на 30-50% ниже, чем при непрерывном оплавлением.

Необходимая мощность при сварке сталей непрерывным оплавлением ориентировочно равна $0,2-0,3 \text{ кВа/мм}^2$, а при сварке с подогревом $0,1-0,2 \text{ кВа/мм}^2$.

Плотность тока при оплавлении обычно составляет $2-6 \text{ а/мм}^2$ для сталей – $5-12 \text{ а/мм}^2$ и для алюминиевых сплавов.

При высокопроизводительных режимах плотность тока достигает $10-20 \text{ а/мм}^2$ для алюминиевых сплавов.

Вторичное напряжение холостого хода сварочного трансформатора U_{20} выбирают с учетом формы детали (лист, круг, квадрат), площади ее поперечного сечения, физических свойств материала.



Н. О. – непрерывным оплавлением

О. П. – оплавление с подогревом.

Установочная длина l_1+l_2 при сварке стальных прутков и труб примерно равна $(0,75-1)d$, а для листов $(4-5)\delta$.

Металлы с большой теплопроводностью сваривают с большей установочной длиной. Для сохранения жесткости часть установочной длины деталей закрепляется изолированными от тока губками.

Припуск на осадку Δ_{oc} должен быть таким, чтобы обеспечить полное закрытие зазора между торцами деталей, полное вытеснение всего расплавленного металла из стыка и пластическую деформацию зоны соединения. Припуск на осадку растет с увеличением сечения деталей. При оплавлении с подогревом припуск на осадку в $1,5-2$ раза больше, чем при непрерывном оплавлении. Δ_{oc} для стальных деталей сечением $100-1000 \text{ мм}^2$ лежит в пределах $2-10 \text{ мм}$.

Скорость сварки выбирают исходя из условий предупреждения кристаллизации и окисления расплава. Обычно скорость осадки выбирают в пределах: для малоуглеродистой стали 30-60 мм/сек, высоколегированных сплавов 60-100 мм/сек, алюминиевых сплавов и других легкоокисляющихся металлов 100-200мм/сек.

Удельное давление при осадке зависит от сечения деталей, их материала и условий нагрева.

При сварке непрерывным оплавлением необходимое удельное давление осадки составляет: для низкоуглеродистых сталей 5-10 кг/мм², для низколегированных сталей 10-12 кг/мм², для аустенитных сталей 15-20 кг/мм².

При сварке с подогревом необходимое усилие осадки примерно в 1,5 раза ниже.

Таблица.

Ориентировочная длительность сварки оплавлением деталей из малоуглеродистой стали и припуски.

Краткая технология стыковой сварки некоторых деталей.

Параметры режима стыковой сварки обычно выбирают по опытным данным (таблицам, графикам, номограммам) с последующим контролем качества соединения и корректировкой режима.

Непрерывным оплавлением сваривают детали сечением до 1000 мм² или детали большого сечения с большим отклонением их периметра к площади (листы, трубы и т. д.).

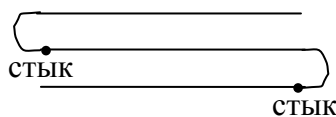
При программном изменении напряжения (высокое напряжение в начале процесса понижается, а в конце вновь повышается) непрерывным оплавлением можно сваривать также детали компактного сечения площадью более 1000 мм².

Подогрев перед оплавлением, расширяющий зону нагрева, применяют для сварки интенсивно закаливаемых материалов и для сварки деталей большого сечения.

Подогрев снижает требуемую электрическую мощность, уменьшает припуск на оплавление, предупреждает кристаллизацию расплава и замедляет охлаждение детали.

Стыковая сварка труб.

Стыковая сварка оплавлением труб широко применяется в котлостроении, аппаратостроении, а также при строительстве трубопроводов.

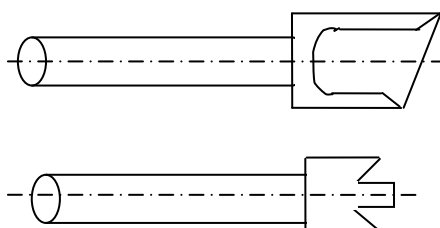


Змеевики из труб диаметром 25-42 мм свариваются из предварительно загнутых элементов, а иногда они получаются путем гибки плети, длиной 40 м и более, сваренной из прямых труб.

Для обеспечения проходного отверстия в стыке внутренний грат и высаженный в стыке металл должны быть полностью удалены.

При сварке оплавлением прямых труб из углеродистой и низколегированной стали, грат удаляют продувкой стыка нейтральными газами при оплавлении или кислородно-воздушной смесью после осадки начала и длительность продувки кислородно-воздушной смесью для предупреждения вымывания металла из стыка строго регламентируют.

При приварке фланцев возможна проточка грата на токарных станках.



В трубах из высоколегированных сталях горячий грат удаляют протяжками, состоящими из серии кольцевых резцов или дорнами со смещенными режущими кромками, которые позволяют уменьшить усилие резания и разделяют грат.

При сварке гнутых элементов для удаления грата может применяться снаряд, криволинейный профиль, которого облегчает его проход через изгибы труб



Немедленно после сварки стыка в змеевик подается сжатый воздух (6-8 атм.), увлекающий с большой скоростью уплотняющий шар 1 и закаленный стальной снаряд 2, срезающий при своем движении горячий грат. У противоположного конца змеевика устанавливается снарядоуловитель 3.

Наружный грат удаляют специальными клещами или срезают разъемными закладными кольцами, сдвигаемыми вдоль трубы. Для труб большого диаметра часто применяют токарную обработку грата вращающимися или стационарными головками.

Режим сварки труб непрерывным оплавлением на машине ЦСТ-200М.

сталь	d, мм	δ , мм	U_{20} В	$\Delta_{\text{опл}}$, мм	$V_{\text{опл}}$ мм/сек	$t_{\text{опл}}$ сек	$\Delta_{\text{ос}}$, мм
20	25	3	6,5-7	11-12	1,37-1,5	8	3,5
	32	4	6,5-7	15	1,25	13	4,5-5
	38	4	6,5-7	15	1,07	14	4,5-5
1X18H12T	25	3	6,5-7	11-12	1,37-1,5	8	4
	32	4	6,5-7	15	1,07	14	5

$$l_1 + l_2 = 60-70 \text{ мм}$$

Стыковая сварка полос.

Полосы свариваются в машинах с плоскими губками. Качество соединения зависит от точности обрезки полос и их установки в губках.

Установочная длина из-за малой жесткости тоже выбирается минимально возможной.

$$l_1 + l_2 = \Delta_{\text{опл}} + \Delta_{\text{ос}} + \Delta_{\text{к}}$$

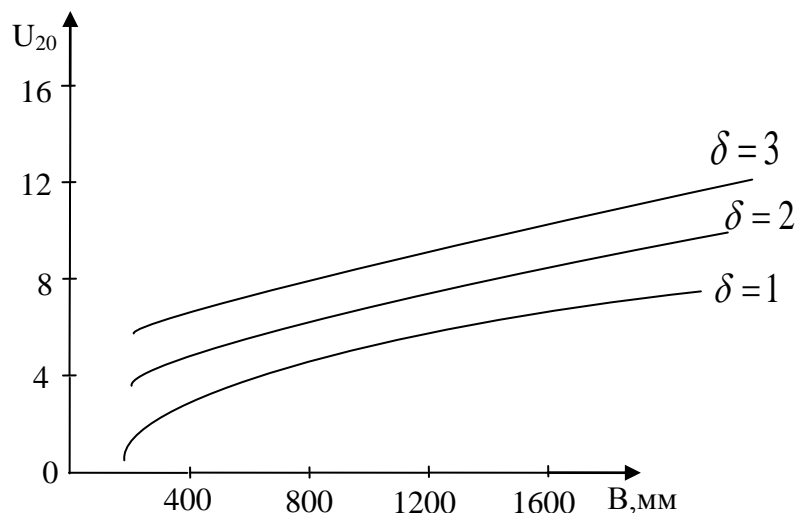
$\Delta_{\text{к}}$ – конечное расстояние между губками, которое обычно составляет $(2,5-3,5)\delta$.

Режим сварки полос из низкоуглеродистой стали.

δ , мм	$\Delta_{\text{опл}}$, мм	$\Delta_{\text{ос}}$, мм	$\Delta_{\text{к}}$, мм	$V_{\text{опл.к.}}$, мм/сек
0,5	2,5	1,8	0,5	6
1	6	2,5	4	5,5
2	9	3	8	5

$$P_{\text{ос}} = 8-10 \text{ кг/мм}^2; V_{\text{ос}} \geq 80 \text{ мм/сек};$$

U_{20} в зависимости от толщины δ ширина полос определяется из графиков:



Для съема грата используют резцовые или плужковые гратосниматели. Грат резцовым гратоснимателем снимается вдоль стыка резцами в горячем состоянии в машине или вне ее. Плужковый гратосниматель снимает грат при протаскивании стыка между ножами.

Грат на полосах из легированных сталей удаляют шлифованием.

Для тонких полос ($\delta \leq 1 \text{ мм}$) используют принудительнооформирование или опрессовывание грата.

Стыковая сварка стержней и проволок.

Проволоку диаметром до 5-8 мм чаще сваривают сопротивлением, а иногда непрерывным оплавлением. Проволоки и стержни большого диаметра сваривают непрерывным оплавлением или оплавлением с подогревом. При сварке проволок особое значение имеет их центрирование, допускаемое смещение осей не должно превышать $(0,05-0,07)d$. В некоторых случаях для центрирования используют центрирующие изолированные от тока вставки.

Установочная длина проволок с $d < 8$ из стали составляет $1,4d$, алюминия $3d$, меди $4d$.

Режимы сварки оплавлением стержней и проволок.

d, мм	F, мм ²	$\Delta_{опл}$, мм	$\Delta_{ос}$, мм	l_1+l_2 , мм	$t_{опл}$, сек
5	19,6	2,5	1,0	8,5	1,5
10	78,6	5	2	17	3,25
20	314	10	3,5	33,5	9
40	1256	20	5,5	65	40

Точечная и рельефная сварка.

Точечной сваркой соединяют листовые конструкции из однородных и разнородных черных и цветных металлов. Точечная сварка широко применяется при изготовлении штампованных конструкций, в которых две или более деталей, штампованные из листа свариваются в жесткий узел (например, пол легкового автомобиля, кабина грузовика и т.д.). Точками часто свариваются каркасные конструкции, когда к жесткому каркасу приваривается обшивка (например, боковина и крыша пассажирского вагона, бункер комбайна и т.д.). Широко применяется точечная сварка пересекающихся стержней диаметром до 25 мм и более при изготовлении арматуры железобетонной в виде сеток и каркасов.

Точечная сварка применяется в основном при изготовлении узлов из листов относительно небольшой толщины (до 2,5 - 4 мм). Иногда применяется сварка узлов из листов толщиной 5 – 10 мм и более.

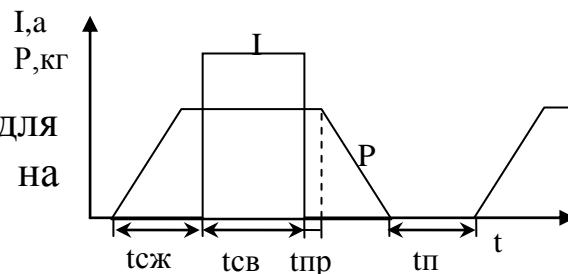
Точечные контактные машины имеют мощность от нескольких сот ватт до тысячи ква. При сварке в массовом производстве с большим количеством точек (арматурных сотах, узлов автомобиля и др.). Успешно применяются многоточечные машины. Общая мощность такой машины нередко превышает 1000 ква.

Современные машины осуществляют сварку по автоматизированному циклу.

Процесс точечной сварки.

Процесс сварки точки состоит из следующих этапов:

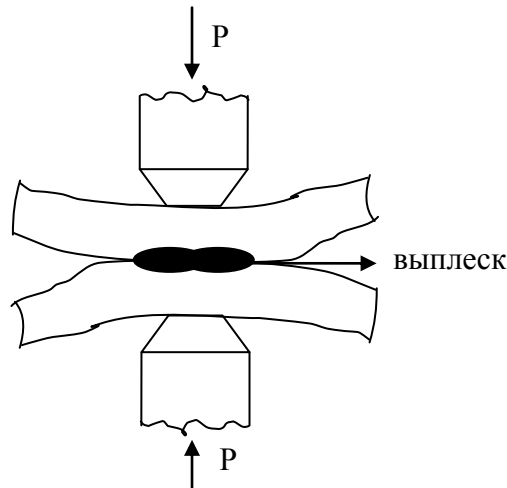
- 1) предварительное сжатие,
- 2) сварка,
- 3) проковка,
- 4) пауза, необходимая для перемещения изделия на 1 шаг.



Точечная сварка всегда начинается с предварительного сжатия деталей для обеспечения хорошего контакта. Если при включение тока усилие P , развиваемое электродами, недостаточное, то контактные сопротивления велики и на них

почти мгновенно выделяется очень большое количество тепла; металл в контакте быстро плавится и выбрасывается в виде искр; происходит так называемый первичный выплеск.

Жидкий металл, сдавленный в ядре, частично выбрасывается – происходит выплеск.



Выплеск наблюдается в начале процесса при слишком быстром нагреве и недостаточном P (металл плавится до образования уплотняющего кольца или к концу чрезмерного нагрева, когда из-за значительного увеличения диаметра ядра его тонкая оболочка прогибается, растете гидростатическое давление в ядре и кольцо прерывается).

При сварке с расплавлением ядра кристаллизация металла в нём сопровождается с усадкой с возможным образованием раковин и пор. Обжатие кристаллизующегося металла способствует его уплотнения. Поэтому снятие давления с электродов должно запаздывать относительно момента выключения тока на время $t_{пр}$ достаточное для завершения кристаллизации ядра.

Влияние основных параметров процесса на нагрев и качество сварной точки.

Основными параметрами режима точечной сварки являются: сварочный ток $I_{св}$, время и его протекание $t_{св}$, усилие сжатия при сварке P и проковки $P_{пр}$, размеры рабочей поверхности электрода $d_э$ (при цилиндрических электродах) или $R_э$ (при сферических электродах), а также время сжатия $t_{сж}$ и время проковки $t_{пр}$. На качество сварки влияет также состояние поверхности детали.

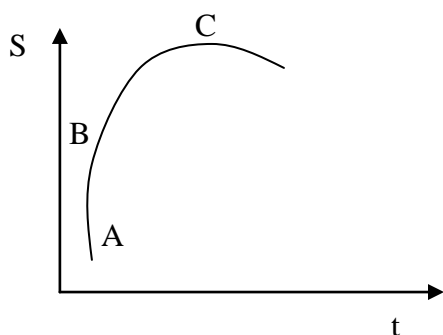
Диаметр рабочей поверхности электродов зависит от толщины свариваемых деталей и связан с ней следующей приближенной зависимостью:

$$d_э = 2\delta + 3 \text{ мм}$$

где δ - толщина более тонкой из свариваемых деталей.

Время протекания тока $t_{св}$.

Зависимость прочности точки от времени сварки при постоянстве остальных параметров процесса имеет вид:



Кривая имеет крутой участок A B, соответствующий, как показывают изломы образцов, сварке без расплавления, и пологий участок B C соответствующий сварке с постепенно увеличивающимся расплавленным ядром.

Максимальный диаметр расплавленного ядра, достигаемый в точке C обычно связан с диаметром электрода следующей зависимостью:

$$d_m = (0,9 - 1,4)d_э$$

Дальнейший нагрев нецелесообразен из-за значительного выплеска и вмятия поверхности деталей, понижающих прочность

соединения. Предельный диаметр ядра тем больше, чем толще свариваемый материал и чем «мягче» режим.

Точки стабильной прочности получают только при сварке с расплавлением, так как при сварке без расплавления из-за крутизны участка АВ даже незначительные колебания времени сварки или других параметров, влияющих на нагрев, неизбежные на производстве, значительно изменяют их прочность. Лучшие результаты дают режимы близкие к точке С.

Аналогичный вид имеют графики зависимости прочности тока от величины сварочного тока $I_{св}$ при $t_{св} = \text{const}$ и постоянстве остальных параметров.

$$I_{св} = \sqrt{\frac{Q_{э}}{m_r R_{окон} t_{cd}}}$$

Состояние поверхности свариваемых деталей.

Состояние поверхности деталей, определяющих контактное сопротивление, существенно влияет на распределение тепла при сварке и, как следствие, на размер и прочность точек.

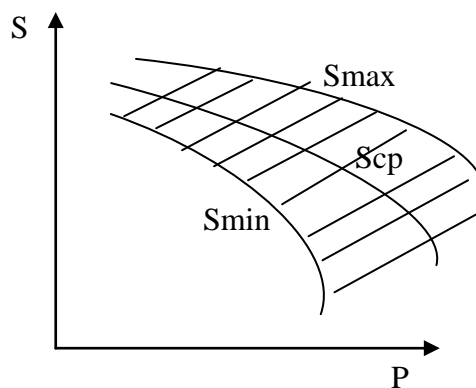
Как правило, точечная сварка неочищенного металла нежелательна, так как при этом размеры и прочность точек нестабильны. Значительное сопротивление контакта электрод-деталь, при неочищенных деталях, вызывает перегрев и быстрый износ электродов. Особую опасность представляет ржавчина т.к. при нагреве из нее выделяется водород, который интенсивно растворяется в расплавленном ядре металла и способствует образованию пор и горячих трещин. Кроме того, большое содержание газов в расплавленном ядре способствует появлению значительных выплесков. Поэтому детали перед сваркой обычно подвергаются механической очистке или плавлению.

Усилие на электродах.

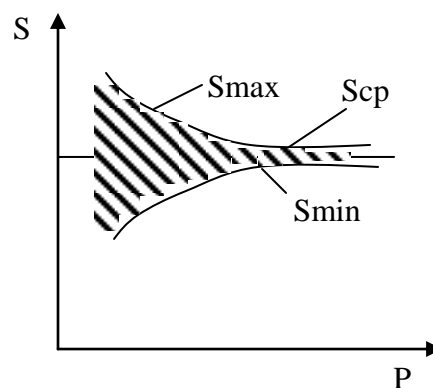
Усилие P – один из выжбнейших параметров точечной сварки, оказывающий двоякое влияние на ее результаты: оно регулирует интенсивность нагрева в зоне сварки и определяет

степень ее пластической деформации. С увеличением P уменьшаются контактные и собственные сопротивления деталей и снижается плотность тока в них. Поэтому при постоянстве

остальных параметров процесса ($t_{св}$, $I_{св}$, d_3) увеличение P замедляет нагрев и приводит к уменьшению размера и прочности точек, при одновременном понижении их стабильности.



Однако, если повышение усилия P на электродах сопровождается таким увеличением $I_{св}$ или $t_{св}$, что средние размеры и прочность точек остаются без изменений $S_{cp} = \text{const}$, то с ростом P прочность точек становится более стабильной.



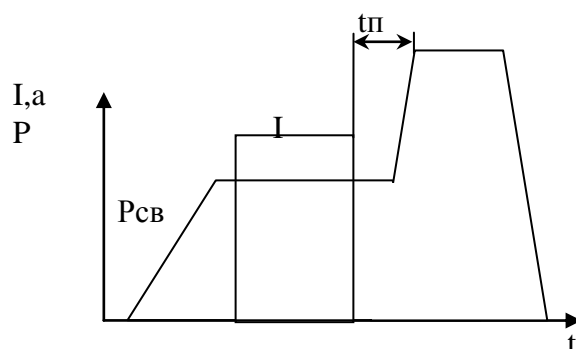
При сварке часть усилия P на электродах всегда затрачивается на предварительное деформирование неплотно собранных деталей для образования между ними контакта. При этом усилие P' , действующее непосредственно в контакте, меньше

усилия P . Чем больше P , тем не постоянное по величине усилие, необходимое для деформирования детали, меньше сказывается на усилии P' , развиваемое в контакте и тем стабильнее условия сварки. Поэтому, точечная сварка развивается по пути применение все больших усилий P в сочетании с мощными машинами.

Удельное давление электродов при осадке, достаточное для уплотнения ядра при кристаллизации, зависит от свойств свариваемого материала, его толщины и режима сварки. Чем выше его сопротивление пластической деформации, тем больше это давление. Например, при сварке низколегированных сталей оно выше, чем при сварке малоуглеродистой стали; при сварке нержавеющей сталей и жаропрочных сплавов оно ещё больше.

Необходимое удельное давление быстро растёт с увеличением толщины деталей вследствие удлинения процесса кристаллизации металла в ядре и увлечения толщины твёрдой оболочки между ядром и поверхностью деталей.

При этом в центре ядра кристаллизация завершается при более низкой температуре поверхности деталей, что затрудняет пластическую деформацию. Это давление растёт также с уменьшением $t_{св}$ (при сварке на «жестких» режимах). Интенсивно нагретый столбик диаметром $d_э$ деформируемый электродами, как бы окружен матрицей диаметром $D_{из}$ относительно холодного материала, вследствие чего ядро находится в объемно-напряженном состоянии, затрудняющем пластическую деформацию. Чем меньше $t_{св}$, тем меньше зона разогрева (меньше D) и жестче матрица, тем труднее деформировать ядро. Если для уплотнения ядра требуется давление, затрудняющее нагрев свариваемых деталей из-за уменьшения контактных сопротивлений и плотности тока, то его создают только на время кристаллизации ядра в виде ковочного давления.



Ковочное давление $R_{пр}$ должно следовать за выключением тока через небольшой интервал времени $t_{п}$. При большом

запаздывании ($t_{\text{п}} \geq 0,2$ сек) оно бесполезно, а при $t \leq 0$ возможно выдавливание расплавленного металла из ядра – происходит выплеск, сопровождаемый глубоким вмятием на поверхности деталей.

Проковка приводит к наклёпу в зоне сварной точки, что заметно повышает усталостную прочность соединения.

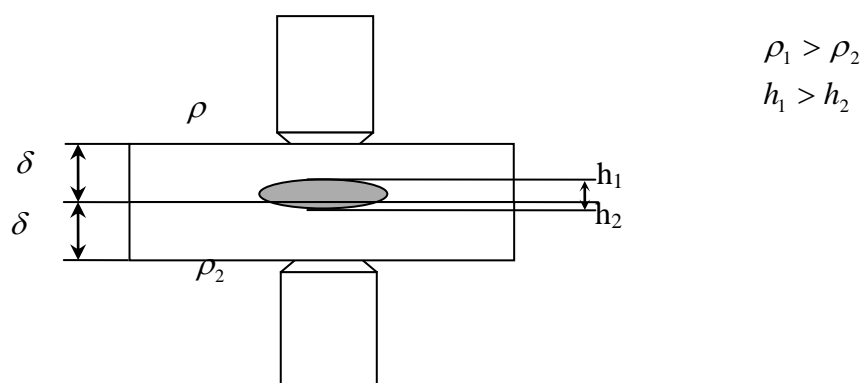
Время сжатия $t_{\text{сж}}$ должно быть достаточно для сжатия деталей электродами машины и нарастания усилия до необходимого значения $P_{\text{д}}$. Оно зависит от расстояния между электродами (раствора хоботов) машины и для машин с пневматическим приводом находится в пределах 0,2-2 секунды.

Время проковки $t_{\text{пр}}$ должно быть достаточно для завершения кристаллизации расплавленного металла в ядре, однако меньше времени, необходимого для полного остывания деталей, зажатых между электродами. Условия охлаждения сварной точки могут существенно влиять на её механические свойства. Охлаждение всегда начинается между электродами и заканчивается, как правило, на воздухе. Из-за интенсивного отвода тепла скорость охлаждения в электродах значительно выше скорости охлаждения на воздухе. Это особенно заметно при сварке тонкого металла (например, стали толщиной 1-2 мм).

Поэтому затягивание ковочного давления может приводить к хрупкости точек из-за их закалки. Например, при сварке стали, содержащей 0,2% С толщиной 1,5 мм при увеличении $t_{\text{пр}}$ с 0,1 до 1,5 секунды разрушение точки при испытании вместо пластичного становилось хрупким.

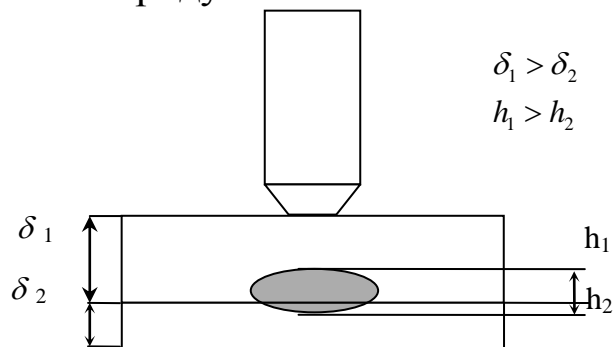
На температурное поле в зоне сварки и, как следствие, на размер ядра и прочность точки могут влиять также следующие факторы:

а) неодинаковое удельное сопротивление свариваемых деталей. Деталь с большим ρ проплавляется на большую глубину. Ядро смещается в деталь с большим ρ .



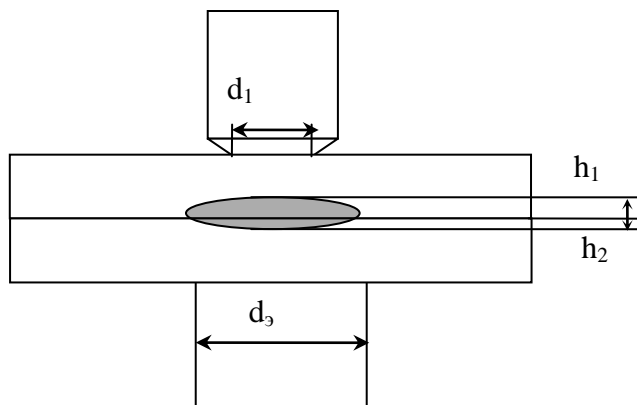
б) неодинаковая толщина деталей.

В этом случае при одинаковом диаметре электродов ядро смещается в деталь большей толщины, так как в этой детали выделяется больше тепла и менее интенсивен его отвод к электроду.



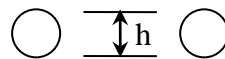
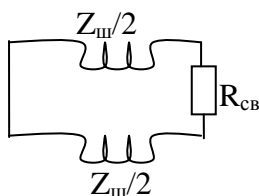
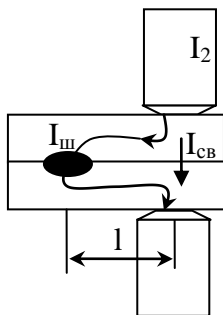
в) неодинаковый диаметр электродов.

Ядро смещается к электроду с меньшей контактной поверхностью, где выше плотность тока.



Шунтирование тока при точечной сварке.

Под шунтированием понимают ответвление тока, через ранее сваренные точки или случайные контакты.



$$I_2 = I_{св} + I_{ш}$$

$$I_{ш} = I_{св} R_{св} / Z_{ш}$$

$$R = K_{п} \rho_{т} \frac{2l}{h\delta}$$

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

где $X_{Lш}$ – индуктивное сопротивление шунта

M – коэффициент поверхностного эффекта

$$X_{Lш} = 0, \text{ тогда } Z_{ш} = mR_{ш}$$

Коэффициент поверхностного эффекта m зависит от толщины деталей.

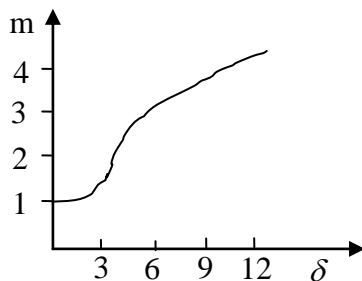


График зависимости m от δ для сталей.

При сварке стали толщиной менее 1 мм можно считать $m=1$.

При шунтировании через смежную точку диаметром d_T , расположенную с шагом S в деталях толщиной δ и шириной b с удельным сопротивлением ρ_T

$$R_{ш} = K_{п} \rho_{т} \frac{2l}{h\delta}$$

$$R_{ш} = 2 R'_{ш} \frac{\rho_{т}}{\delta}$$

Безразмерный параметр $R'_{ш}$ зависит от безразмерных параметров S/d_m и S/b .

Сопротивление шунта уменьшается с увеличением толщины деталей δ и с уменьшением шага точек S , тогда как сопротивление зоны сварки $R_{св}$ растёт с увеличением δ . Степень шунтирования возрастает с увеличением толщины деталей и с уменьшением шага точек.

Для стальных деталей толщиной ≤ 1 мм шунтирование обычно можно пренебречь. При толщине деталей 3 мм и более ток шунтирования может достигать $(0,3 - 0,4)I_{св}$.

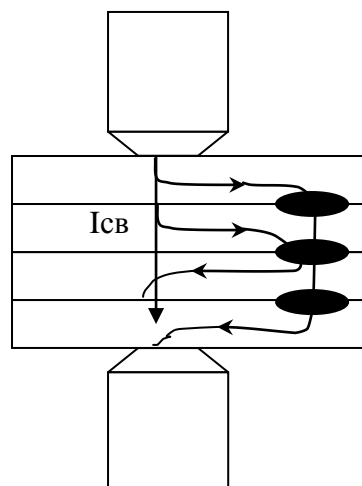
Особенно сильно проявляется шунтирование при соседстве свариваемой точки с несколькими ранее сваренными. Поэтому, важную роль играет последовательность постановки точек. Например, при сварке арматурной сетки из прутков диаметром 6 мм в последовательности по спирали прочность последней 36^й точки, окруженной 4^{мя} ранее сваренными точками, составляет всего (0,3-0,4) от прочности первой.

14	15	16	17	18	1
13	26	27	28	19	2
12	25	30	29	20	3
11	24	23	22	21	4
10	9	8	7	6	5

При сварке той же арматурной сетки последовательность рядами прочность любой точки не ниже чем (0,8-0,9) от прочности первой.

1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30

Шунтирование интенсивно проявляется при сварке нескольких деталей в пакете. Поэтому при проектировании конструкции необходимо стремиться к тому, чтобы качество деталей, сходящихся в узле, было минимально.

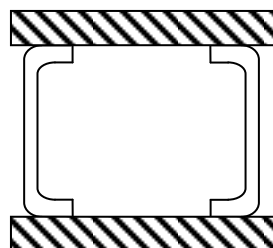
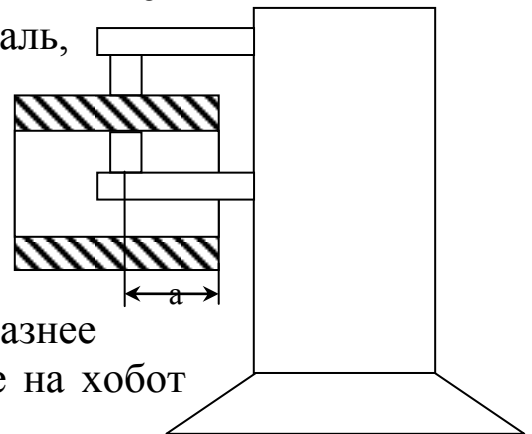


Шунтирование особенно велико при сварке алюминиевых сплавов с малым удельным сопротивлением и высоким контактным сопротивлением пленки Al_2O_3 . Поэтому минимальный шаг точек при сварке этих сплавов больше, чем при сварке стали той же толщины.

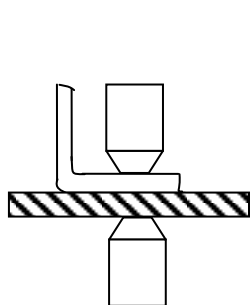
Конструктивное оформление узлов при точечной сварке.

Конструктивные требования к узлам определяются технологическим процессом сварки и применяемым оборудованием. Специальное оборудование и приспособления позволяют сваривать изделия очень сложной формы. При использовании универсального оборудования и простейших приспособлений желательно учитывать следующее:

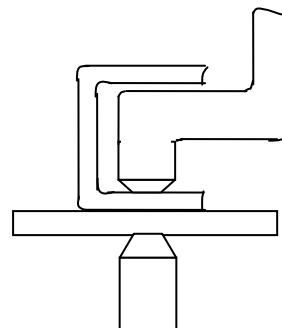
а) сечение деталей и приспособлений из магнитной стали вводимых в контур машины, должны быть минимальными, так как магнитная сталь, введенная в контур, увеличивает его сопротивление и понижает сварочный ток. С изменением a изменяются условия сварки, что ведёт к нестабильности её результатов. Поэтому конструкция из магнитной стали с отбортовкой целесообразнее коробчатого узла, надеваемого при сварке на хобот машины.



б) все точки по возможности должны допускать применение нормальных интенсивно охлаждаемых электродов. Поэтому соединения по рис. а целесообразнее соединений по рис. б.



а)

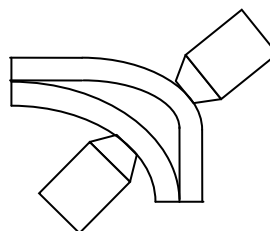
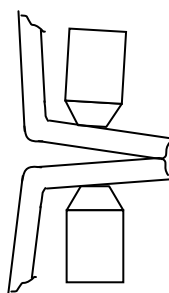


б)

в) желательно, чтобы все точки в узле можно было сварить в любой последовательности, что облегчает борьбу со сварочными деформациями.

г) точки диаметром d_T не должны размещаться ближе, чем на $1,5 d_T$ от края детали во избежания выдавливания горячего металла у кромки.

д) точки не должны располагаться в трудно деформируемых местах.



Общие особенности технологии точечной сварки.

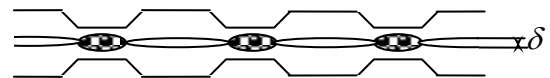
При точечной сварке необходимо обеспечить высокую и стабильную прочность соединений при минимальных сварочных

деформациях и высокой производительности самой сварки и связанных с ней операций.

Точность сваренного узла обеспечивается точной заготовкой и сборкой деталей, отсутствием их взаимного смещения и больших деформаций при сварке. Неточная заготовка и плохая сборка искажают форму изделия и часто снижают производительность труда (из-за дополнительной правки при сварке и после сварке).

Деформации при точечной сварке бывают местными и общими. Первые происходят рядом со свариваемой точкой и обычно связаны с перегревом.

Зоны сварки – между деталями появляется зазор δ , а поверхность деталей из-за глубоких вмятин приобретает вид стеганого одеяла.



Общие деформации обычно вызываются неодинаковым нагревом деталей. Например, при сварке листа с небольшим угольником последний прогревается сильнее и при остывании угол заметно деформируется.

При сварке крупных и нежестких узлов (например, обшивки вагона) возможны большие деформации и борьба с ними – одна из главных задач технолога.

Деформации уменьшаются при жестких режимах сварки, её рациональной последовательности, надёжном закреплении деталей при сварке (например, при одновременном их зажатии большим количеством электродов в многоточечной машине) и искусственном охлаждении зоны сварки (например, сжатым воздухом с распыленной водой по способу МВТУ им. Баумана).

Последовательность сварки точек в узле устанавливается, так чтобы сварить все точки при минимальном шунтировании тока. Начиная сварку с прихваток (точками), размещают их в наиболее трудно свариваемых местах (вблизи ребёр, на закруглениях и т. д.). После прихватки остальные точки желательно сварить подряд. Длинные соединения свариваются от середины к концам.

При сварке деталей неодинаковой толщины режим определяется толщиной более тонкой детали обычно с небольшим увеличением тока.

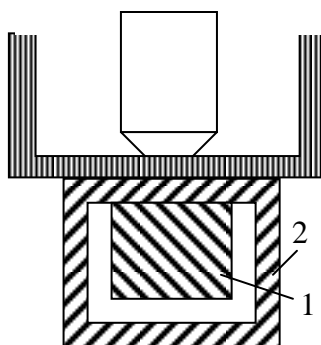
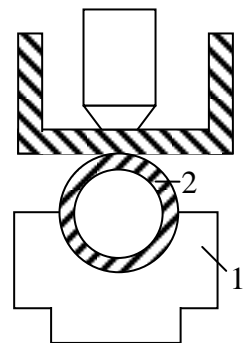
При сварке трёх деталей неодинаковой толщины возможны два типовых случая:

1) в середине размещается толстая деталь – режим выбирается по тонкой детали с некоторым увеличением тока.

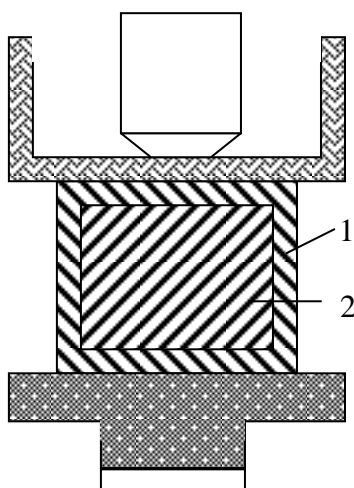
2) Тонкая деталь зажата между толстыми – режим выбирается по толстой детали со значительным уменьшением тока или тсв.

Сварка листовых деталей с трубчатыми возможна в трёх вариантах:

1) на подкладном электроде 1 (при достаточной жёсткости трубы 2)



2) на медной оправке 1 (при достаточно большом внутреннем отверстии и небольшой длине детали 2).



3) на подкладном электроде с заполнением нежёсткой детали 1 легко плавким металлом 2 (алюминием, цинком, свинцом), выплавляемом после сварки, а при большей её жёсткости песком или парафином.

Сварка конструкционных сталей.

Холоднокатаные стали, не имеют окалины и обычно не требуют очистки перед сваркой (если при хранении они не поржавели). В массовом производстве ответственных изделий детали из этих сталей перед сваркой обезжиривают ацетоном, бензином или растворителем типа $\text{Na}_2\text{PO}_4(30\text{г})+\text{NaOH}(40\text{г})+\text{Na}_2\text{CO}_3(25\text{г})$ и промывают в горячей (70-80⁰С) и холодной воде.

Горячекатаная сталь покрыта окалиной, а иногда и ржавчиной. Обычно перед сваркой она очищается травлением в растворе $\text{H}_2\text{SO}_4(110\text{г})+\text{NaCl}(10\text{г})$ с нейтрализацией в растворе NaOH или KOH и промывкой в горячей воде или механически (наждачным кругом, напильниками шкуркой, металлическими щётками и т. д.). Лучшие результаты даёт травление.

Малоуглеродистые стали мало чувствительны к термическому циклу сварки и при толщине до 5 мм хорошо свариваются как при большой, так и при малой скорости нагрева (на жёстких и мягких режимах).

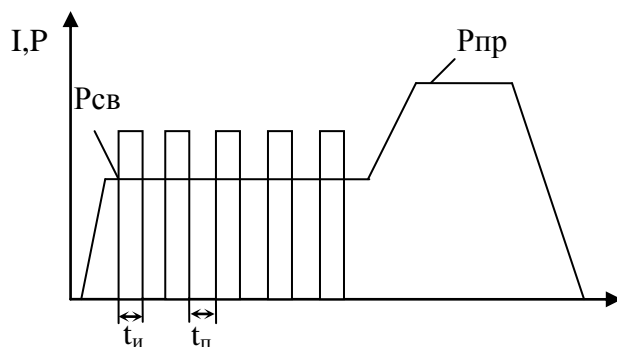
Плотность тока на мягких режимах 80-60 а/мм², на жёстких режимах 200-400 а/мм².

Диаметр электрода $d_s = 2\delta + 3_{\text{мм}}$, усилие сжатия (постоянное при сварке и проковке) $P_{\text{сж}} = (100 - 200)\delta$. $P_{\text{сж}} = 3-6\text{кг/мм}^2$ на мягких и 5-12кг/мм² на жёстких режимах.

Ориентировочные режимы точечной сварки низкоуглеродистой холоднокатаной стали.

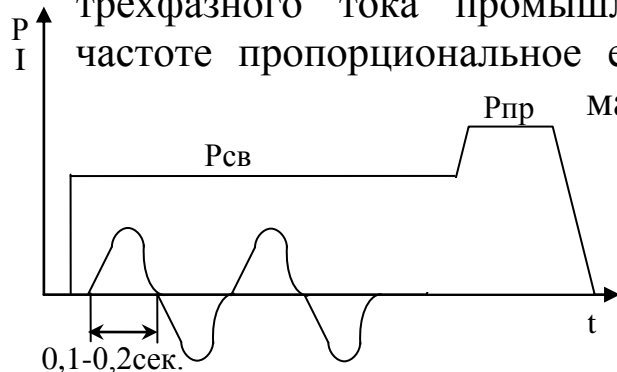
δ , мм	d_3 , мм	Жёсткий режим			Средний режим			Мягкий режим		
		$P_{сж}$, кГ	$I_{св}$, ка	$t_{св}$, сек	$P_{сж}$, кГ	$I_{св}$, ка	$t_{св}$, сек	$P_{сж}$, кГ	$I_{св}$, ка	$t_{св}$, сек
0,6	4	125	7	0,1	100	6	0,1	100	5	0,2
1,0	5	225	10,5	0,16	150	0,5	0,2	150	7,5	0,4
1,5	6,5	350	13	0,24	250	10,5	0,3	250	8,5	0,5
2	7,5	450	15	0,36	350	12,5	0,44	350	10,5	0,6

Детали толщиной более 5 мм обычно сваривают с повышением давления при проковке $P_{пр}=(2-2,5)P_{св}$. При этом обычно используется не один, а несколько импульсов тока, чередующихся с паузами



Например, малоуглеродистая сталь толщиной 8мм сваривается на машине мощностью 150 кВа 12-15 импульсами тока продолжительностью 0,25-0,35 сек каждый с паузами 0,08-0,12 сек импульсное

включение тока улучшает охлаждение электродов и уменьшает их износ. Детали большой толщины целесообразно также сваривать током низкой частоты 3-5 гц. Для его получения через сварочный трансформатор пропускаются импульсы выпрямленного трёхфазного тока промышленной частоты. При низкой частоте пропорциональное ей индуктивное сопротивление машины очень мало



и поэтому снижается потребляемая мощность. Введение в контур машины стальных элементов практически не влияет на величину тока. Плавное нарастание тока в каждом импульсе уменьшает перегрев и износ электродов. Сталь толщиной 12 мм на низкочастотных машинах может свариваться на следующем режиме: $I_{св}=40000\text{а}$, $N=200\text{кВа}$, $t_{св}=10-16\text{сек}$, $t_{пр}=3\text{сек}$, $R_{св}=5000\text{кг}$, $R_{пр}=7500\text{кг}$. При этом прочность точки достигает 20000кг.

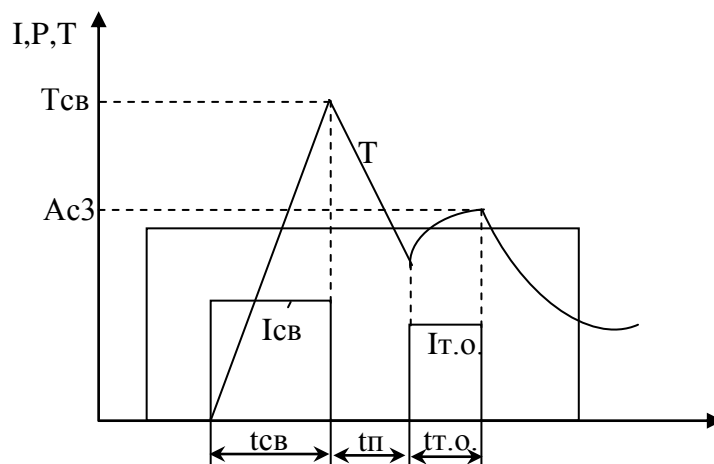
Сварка закаливающихся сталей.

Стали закаливающиеся при точечной сварке (углеродистая сталь с содержанием более 0,20%С и низколегированные стали с содержанием более 0,12%С) свариваются по трём вариантам технологии, уменьшающим хрупкость и опасность появления трещин:

1) На «мягком» режиме с последующей общей термообработкой узла.

2) На очень «мягком» режиме без последующей термообработки.

3) На «жёстком» режиме импульсом тока $I_{св}$ с непосредственно следующей за ним электродинамической обработкой точки импульсом тока $I_{т.о.}$.



Общая термообработка даёт наибольшую однородность структуры и свойств, но, как правило, понижает усталостную прочность из-за снятия наклёпа в зоне сварных точек. Её применение ограничивается небольшими жёсткими узлами. Недостаток очень «мягких» режимов – пониженная производительность и большие сварочные деформации. Лучшие результаты обеспечивает сварка с электродинамической обработкой.

Ориентировочные режимы точечной сварки закаливаемых сталей марок 30ХГСА, 40ХНМА с последующей термообработкой в электродах машины.

δ , мм	$d_э$, мм	$P_{сж}$, кГ	Импульс сварки		$t_{п}$, сек	импульс термообработки	
			$I_{св}$,ка	$t_{св}$,сек		$I_{т.о.}$,ка	$t_{т.о.}$,сек
1	5-6	100	6	0,6	0,2	3	0,6
2	7-9	200	9	1,4	0,4	4,5	1,4
3	9-10	400	12	2,0	0,5	6	2,0

Точечная сварка аустенитных сталей.

Хромоникелевые стали типа 1Х18Н9 сваривают на жёстких режимах с длительностью в 1,5-2 раза меньшей, чем низкоуглеродистые стали. Давление на электродах повышается до 16 кг/мм^2 , сварочный ток из-за низкой тепло и электропроводности понижается на 30-40%.

Ориентировочные режимы точечной сварки стали типа 1Х18Н9

δ , мм	$d_э$, мм	$P_{сж}$, кГ	$t_{св}$,сек	$I_{св}$,ка
0,5	4	90-180	0,04-0,08	3-4
1,0	5	200-400	0,10-0,16	4,5-6
2	8	450-700	0,20-0,28	6-10

Аустенитные стали с повышенным содержанием хрома и никеля (например, Х23Н18) сваривают на относительно «мягких» режимах ($t_{св}=0,8-1,5$ сек) во избежание образования горячих трещин, но при высоких удельных давлениях 18-22 кг/мм².

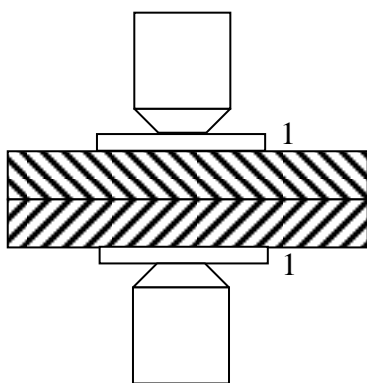
Аустенитные стали хорошо свариваются с конструкционными. При этом ядро точки смещается в аустенитную сталь, имеющую большее удельное сопротивление и более низкую температуру плавления.

Точечная сварка цветных металлов и их сплавов.

Алюминий и его сплавы.

Чистый алюминий трудно поддаётся точечной сварке из-за высокой электро и теплопроводности. Сварка сопровождается частичным привариванием электрода к детали из-за перегрева их контакта. Это увеличивает износ электродов и портит поверхность деталей.

Иногда между электродом и деталью вводят теплоизолирующие прокладки (1) из нержавеющей стали толщиной 0,1-0,2 мм.



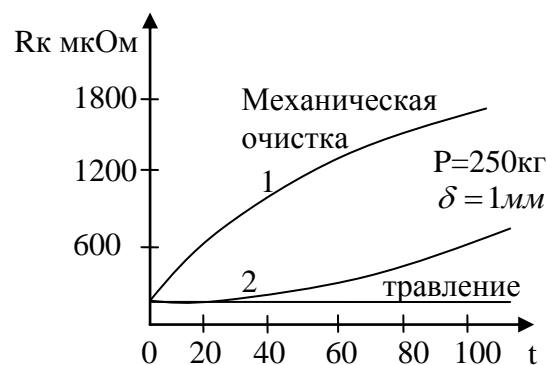
Эти прокладки не привариваются ни к электродам, ни к деталям.

Однако сварка в этом случае происходит со сквозным проплавлением деталей, при котором повреждается лицевая поверхность деталей из-за сквозных усадочных пороков ядра.

В силу этих причин точечная сварка чистого Al применяется редко.

Точечная сварка алюминиевых сплавов широко применяется в промышленности. Важной особенностью сварки этих сплавов является необходимость удаления окисной плёнки Al_2O_3 ,

обладающей высоким электросопротивлением и твёрдостью. Поэтому перед сваркой детали обычно подвергаются механической очистке стальной быстровращающейся щёткой (с проволочками диаметром до 0,1 мм) или мелкой наждачной бумагой, или химической очисткой. После механической очистки окисная плёнка вскоре образуется вновь, и её сопротивление быстро растёт с течением времени. Непосредственно после очистки контактное сопротивление составляет около 500 мкОм, а в течение 20-30 часов оно возрастает (кривая 1) до 1000 мкОм и выше.



В крупносерийном производстве используется химическая очистка, состоящая из предварительной промывки бензином или ацетоном, обезжиривание в щелочных ваннах, промывки, травление в растворе ортофосфорной кислот H_3PO_4 (300-350 на 1 л воды) с добавлением хромпика $K_2Cr_2O_7$ (0,1-1г). При такой обработке на поверхности деталей образуется тонкая фосфатно-хромовая плёнка, сопротивление которой очень мало изменяется в течение трёх суток (кривая 2).

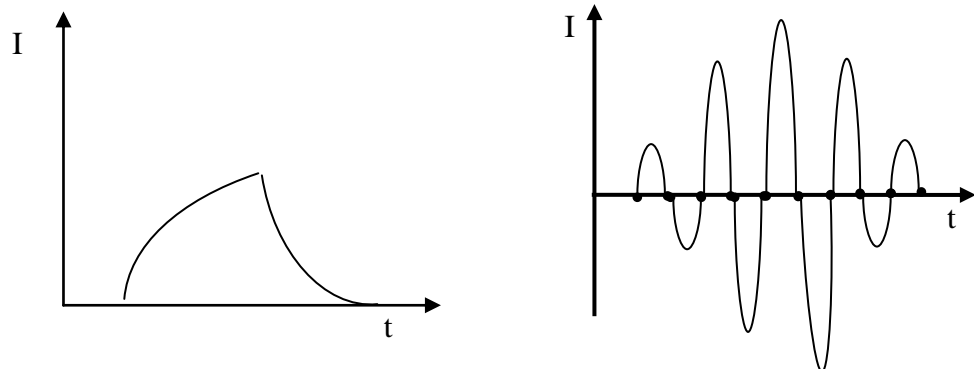
Сварку алюминиевых сплавов целесообразно проводить на жёстких режимах, для уменьшения зоны местного разупрочнения термически или механически упрочнённых сплавов.

$$t_{св} = (0,15-0,4) \text{ сек}, j = (1000-1500) \text{ а/мм}^2, P = 16-22 \text{ кг/мм}^2 \text{ при } \delta = 1-3 \text{ мм}$$

Дальнейшее уменьшение $t_{св}$ не улучшает качества соединений, но ведёт к увеличению необходимой мощности машины.

Для уменьшения перегрева контакты электрод-деталь, способствующего износу электродов и повреждению деталей, желательно постепенное нарастание тока. Это обеспечивается при

сварке импульсом выпрямленного тока. На обычных машинах переменного тока применяется его модулирование.



Для уменьшения начального сопротивления контакта электрод-деталь и обеспечение хорошего теплоотвода применяются электроды со сферической контактной поверхностью

При сварке деталей толщиной до 1,5-2 мм удастся обеспечить уплотнение ядра при кристаллизации без повышенного ковочного давления. Удельное давление составляет при этом 16-22 кг/мм². При большей толщине деталей применяют ковочное давление

$$P_{\text{пр}} = (3-4)P_{\text{св}}$$

Ориентировочные режимы точечной сварки дюралюминия на импульсных машинах (МТПТ-600).

δ , мм	$R_{\text{э}}$, мм	$P_{\text{св}}$, кг	$P_{\text{пр}}$, кг	$t_{\text{имп}}$, сек	$I_{\text{св}}$, кА
2,0	75	700	2400	0,22	47
3,0	100	800	2800	0,3	56
4,0	150	1100	4200	0,35	75
1,0		450	450	0,12	24

Медь и её сплавы.

Точечная сварка чистой меди возможна тугоплавкими молибденовыми или вольфрамовыми электродами, или с применением теплоизолирующих прокладок из нержавеющей стали, располагаемых между медными электродами и деталями. Качество такой сварки невысокое из-за повреждения поверхности деталей, и она не применяется в промышленности.

Условия сварки медных сплавов определяются их физическими свойствами и составом. Чем выше электро- и теплопроводность сплав, тем труднее его точечная сварка. Хорошо свариваются, например, мельхиор (80%Cu;20%Ni; электропроводность около 8% проводимости меди), кремнистая бронза (3%Si, электропроводность 9%). Несколько хуже свариваются латуни (электропроводность латуни Л62 составляет около 25% проводимости меди). Латунь сваривается на жёстких режимах ($t_{св}=0,1-0,4$ сек) при относительно высокой плотности тока (в 1,5-2 раза выше, чем при сварке низкоуглеродистой стали той же толщины). Латунь удовлетворительно сваривается со сталью.

Режимы точечной сварки латуни Л62.

δ , мм	$P_{св}$, кГ	$t_{св}$, сек	$I_{св}$, кА
0,5	120	0,1	15
1,0	200	0,16	19
1,5	300	0,20	24
2,0	400	0,24	30

Титан и его сплавы

Титан очень активно взаимодействует с кислородом, азотом и водородом, однако при его точечной сварке обычно не требуется специальной защиты, так как металл ядра не имеет прямого контакта с воздухом. По своим физическим свойствам титан близок к аустенитной стали 1Х18Н9, и поэтому он сваривается на сходных режимах.

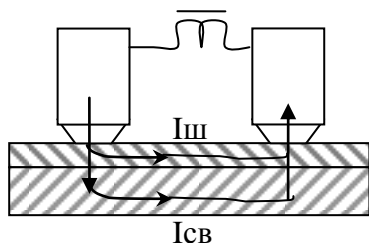
Режимы точечной сварки титановых сплавов.

δ , мм	$P_{св}$, кГ	$t_{св}$, сек	$I_{св}$, кА
0,5	100-150	0,08-0,1	4,5-5
1,0	200-250	0,14-0,16	5-5,5
1,5	300-350	0,18-0,22	6,5-7,5
2,0	400-550	0,24-0,26	8,0-9,0

Односторонняя и двухсторонняя двухточечная сварка.

При изготовлении крупных узлов вагона, автомобиля, т. д. часто применяется одно или двухсторонняя сварка.

Односторонняя двухточечная сварка осуществляется по следующим схемам:



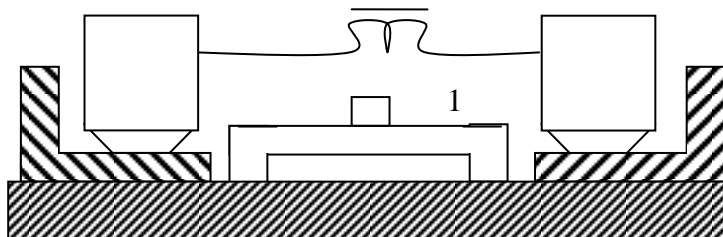
1) без шунтирования

Ток протекает от одного электрода через контакт между деталями нижнюю деталь, и второй контакт ко второму электроду. Часть тока протекает через верхнюю деталь ($I_{ш}$).

Данный способ применяется при сварке деталей разной толщины, когда внизу расположена более толстая деталь или для приварки двух деталей к листу значительной толщины.

При большом расстоянии между точками для

уменьшения непроизводительных затрат на нагрев нижнего листа и предотвращения его перегрева и коробления применяется медный электрод – перемычка, который опускается вместе с электродами.



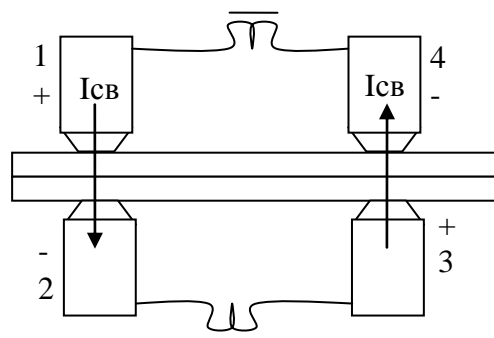
2) *сварка с шунтированием на медной подкладке.*

Применяется при сварке деталей небольшой толщины (до 1,5-2 мм).



Двухсторонняя двухточечная сварка.

Электроды соединяются с двумя трансформаторами, расположенными по обе стороны от изделия. Ток протекает от электрода 1 к электроду 2 и далее от электрода 3 к электроду 4 без большого шунтирования в свариваемых деталях.



Двухточечная сварка обладает по сравнению с одноточечной рядом преимуществ: изделие не охватывается контуром машины, что позволяет сваривать большие изделия при умеренной мощности; повышается производительность процесса.

Многочитродные машины, как правило, построены по двухсторонней двухточечной схеме.

Дефекты и контроль качества точечной сварки.

Дефекты при точечной сварке бывают внешние (выплески, глубокие вмятины, подплавленные поверхности деталей, выходящие на поверхность, трещины) и внутренние (непровар, рыхлость, трещина в ядре).

Внешние дефекты обнаруживаются осмотром. Наружный выплеск и подплавление поверхности ухудшает внешний вид соединений и резко снижает стойкость электродов. Наружный выплеск возникает при малом усилии сжатия или при загрязненности поверхности деталей и электродов, а также при неправильной установке электродов. Глубокие вмятины на поверхности возникают при чрезмерном $I_{св}$ или $t_{св}$, малой контактной поверхности электродов или чрезмерном $P_{пр}$.

Внутренние дефекты обнаруживаются рентгеновским или ультразвуковым контролем. Внутренние рыхлости и трещины обычно возникают вследствие недостаточного давления при проковке или при запаздывании включения ковочного давления.

Наиболее опасным внутренним дефектом, резко понижающим прочность точки, является непровар (отсутствие или малые размеры литого ядра). Основными причинами непровара являются следующие:

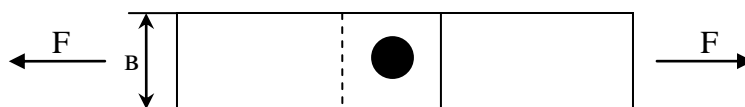
- 1) недостаточная величина тока или уменьшение его вследствие падения напряжения сети. Значительного шунтирования тока из-за малого шага точек, введение в контур машины магнитной стали, или ослабление затяжки и окисления контактов вторичной цепи машины.
- 2) Недостаточное время сварки или его уменьшение из-за нечёткой работы аппаратуры управления сварочным циклом.

- 3) изменение электрического сопротивления зоны сварки из-за плохой очистки поверхности деталей или изменения величины приложенного к электродам усилия.

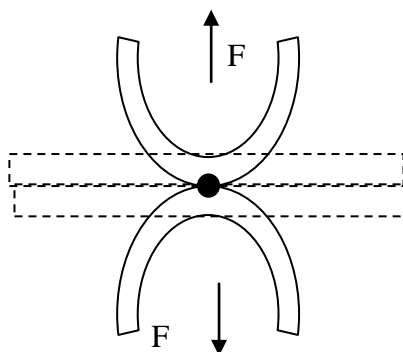
Борьба с непроваром и другими дефектами ведётся путём автоматизации процесса сварки, обеспечивающей строгое соблюдение заданных его параметров и путём контроля качества сварных точек. При активном контроле первоначально устанавливается режим сварки тех или иных деталей на опытных образцах, а в дальнейшем периодически (один, два раза в смену) свариваются и испытываются контрольные образцы для проверки стабильности принятого режима.

Испытания сварных точек обычно производятся на срез или растяжение.

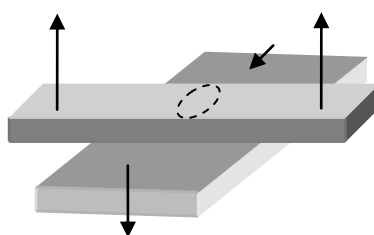
На срез испытываются образцы шириной $b = 5\delta + 15 \text{ мм}$ сваренные одной точкой.



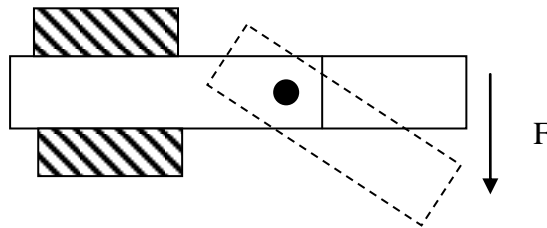
Испытание точки на растяжение при толщине деталей до 3-4^x мм производятся на U-образных образцах:



При большей толщине на растяжение испытываются крестообразные образцы:



При подборе режима сварки часто применяются простые технологические пробы: испытание на скручивание:

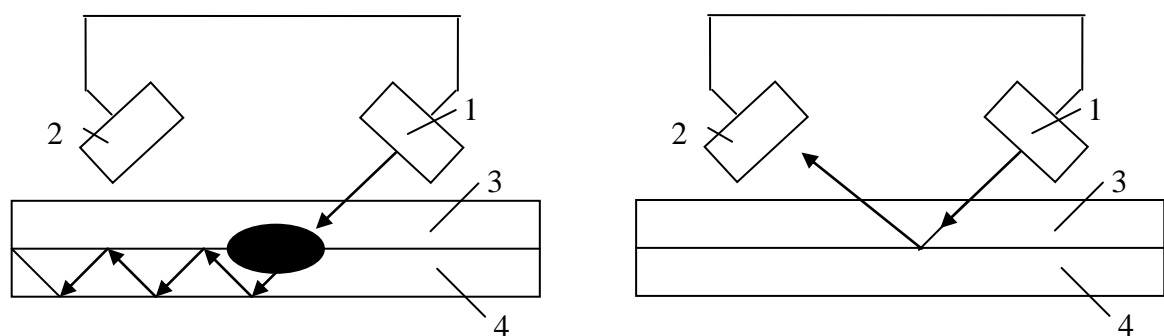


или разрушение зубилом образца зажатого в тисках для выявления степени провара.

При сварке ответственных изделий механические испытания образцов дополняются металлургическим исследованием сечения точек.

Иногда при сварке ответственных изделий кроме контроля режима и качества сварки на пробных образцах производят контроль провара точек непосредственно на изделии с помощью рентгенопросвечивания.

Разработан также более дешёвый ультразвуковой контроль наличие и степени провара сварной точки:



Есть провар

Нет провара

Ультразвуковые колебания от излучателя 1 (которым является пьезокристалл кварца или титолата бария) вводятся в верхнюю деталь 3. при наличии провара между деталями эти колебания через сваренную точку проходят в нижнюю деталь 4, в которой рассеиваются, не попадая в приёмный щуп 2. В случае непровара ультразвуковые колебания отражаются от границы раздела между деталями 3 и 4 и попадают в приёмный щуп 2. На экране индикатора появляется сигнал, свидетельствующий о наличии непровара (при наличии провара при подходе щупа к

точке сигнал пропадает, а затем появляется вновь, в случае непровара сигнал не пропадает).

Роликовая сварка.

Область применения роликовой сварки и типовые узлы.

Роликовая сварка даёт непрерывный прочно-плотный шов. Роликовая сварка применяется в автомобилестроении (сварка бензобака, глушителя), в производстве электрохолодильников (изготовление шкафа и испарителя), при изготовлении бидонов, огнетушителей и других ёмкостей и т. д.

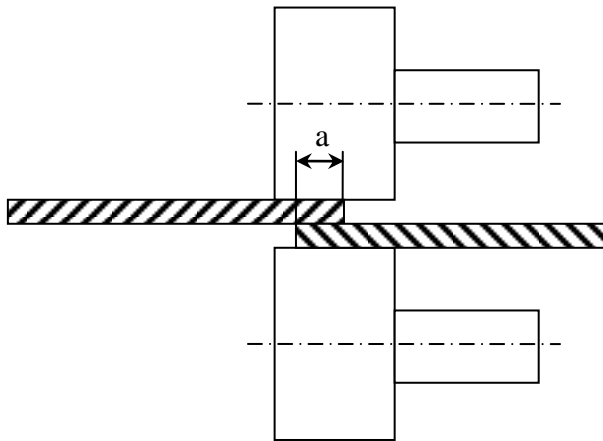
Здесь надо отметить большие заслуги советских учёных, которые создали уникальные и единственные в мире машины для роликовой сварки.

Наибольшее распространение при роликовой сварке получили соединения с отбортовкой и внахлестку:



Преимуществом соединения с отбортовкой является размещение деталей вне сварочного контура машины, а также отсутствие пересекающихся швов. Недостатком – необходимость штамповки с глубокой вытяжкой, что оправдывается только при массовом производстве. Ширина отбортовки для предотвращения выдавливания разогретого металла и выплесков должна быть не менее: 12 мм при $\delta=1\text{мм}$, 16 мм при $\delta=1,5\text{мм}$, 18мм при $\delta=2\text{мм}$.

Аналогично ширина нахлестки (a) также должна быть не менее 12-18 мм.

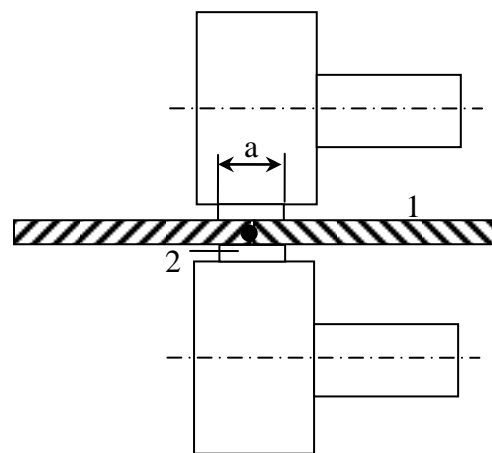


Иногда требуется, чтобы после роликовой сварки внахлестку на поверхности изделия не было уступа. В этих случаях возможна сварка с раздавливанием кромок.

Соединение собирается с узкой нахлесткой ($a=(1,5-2)\delta$) и сваривается широкими

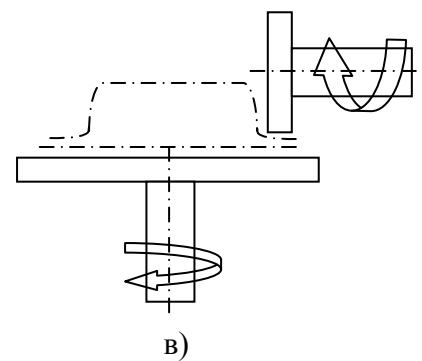
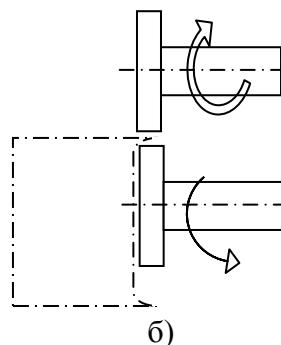
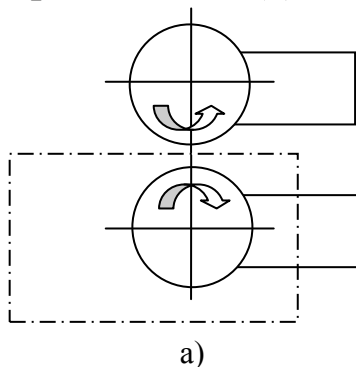
роликами. Основной недостаток данного метода – быстрый износ электродов и относительно невысокая прочность соединения.

Прочный стык без уступа может быть получен также при сварке с накладками.

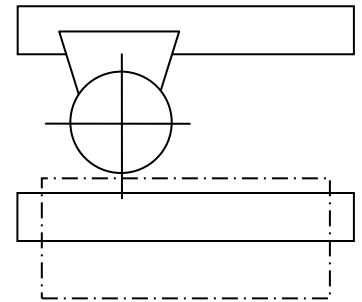


При этом свариваемые детали 1 собираются встык, а на стык с обеих сторон накладываются тонкие стальные ленты 2 ($\delta=0,1-0,3\text{мм}$), служащие как бы теплоизоляцией зоны сварки от дисковых электродов. При протекании тока детали в зоне стыка нагреваются до расплавления, и образуется прочное соединение с вдавленными заподлицо накладками.

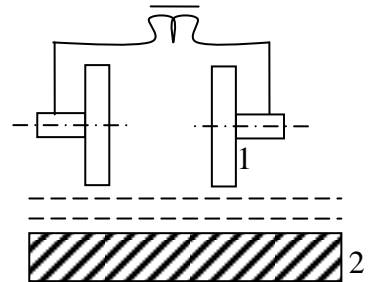
Современные роликовые машины имеют мощность от нескольких киловатт до 1000 кв. Как правило, они снабжены автоматической аппаратурой управления. Обычно машины имеют два дисковых электрода-ролика для двухсторонней сварки продольного (а), поперечного (б) и иногда фланцевого (в) шва:



Иногда применяется сварка на электроде-оправке, при которой детали закрепляются на нижнем электроде определенной формы, а верхний ролик прокатывается на неподвижной детали.



Применяется также односторонняя двухшовная сварка двумя электродами. При этом детали закрепляются на подкладном медном электроде 2, а по ним прокатываются ролики, соединённые со сварочным трансформатором.



Возможна также двухсторонняя двухшовная сварка четырьмя электродами.

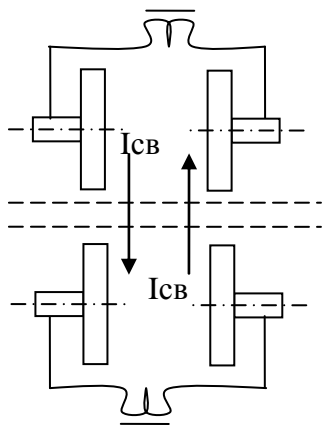
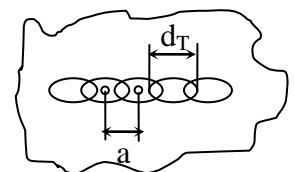


Схема прохождения тока та же что и при двухсторонней двухточечной сварке.

Сущность процесса и нагрев при роликовой сварке.

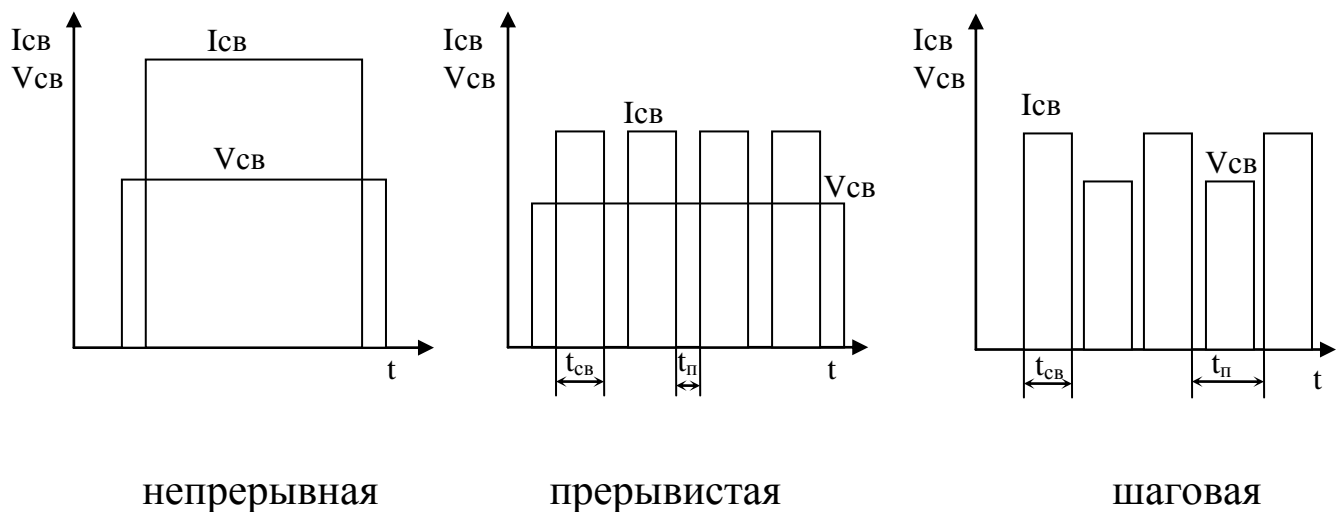
Роликовая сварка по существу является разновидностью точечной сварки, при которой отдельные точки диаметром d_T частично перекрывают друг друга, образуя непрерывный шов.

Для получения плотного шва расстояние между точками $a = (0,5-0,6)d_T$. При $a > d_T$ роликовая сварка переходит в высокопроизводительную ролико-точечную сварку.

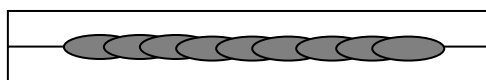


Вследствие малого расстояния между соседними точками наблюдается значительное шунтирование тока, степень которого, однако, уменьшается вследствие высокой температуры и, следовательно, высокого удельного сопротивления металла ранее сваренной точки.

Роликовая сварка бывает непрерывной, прерывистой, шаговой:



Наибольшее распространение получила прерывистая роликовая сварка. Применение непрерывной роликовой сварки ограничено сильным перегревом поверхности деталей, соприкасающейся с электродами, что ухудшает качество сварки и повышает износ электродов. Однако, для определённой скорости сварки и мощности машины возможна сварка деталей небольшой толщины (менее 0,5 мм) непрерывно включенным переменным током. (При этом одной полуволны переменного тока частотой 50 гц достаточно для формирования расплавленного ядра точки, а время перехода тока через нуль достаточно для кристаллизации ядра).

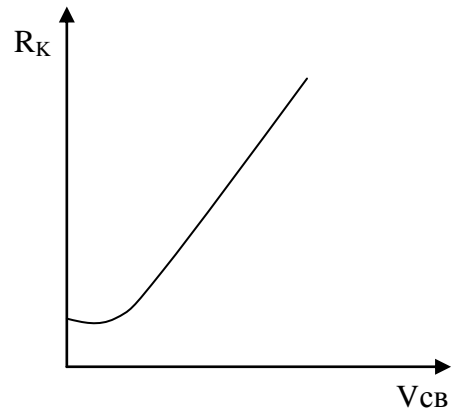


Шаговая сварка применяется при сварке алюминиевых сплавов. Благодаря тому, что при протекании тока детали неподвижны, уменьшается сопротивление контакта электрод-деталь и обеспечивается более

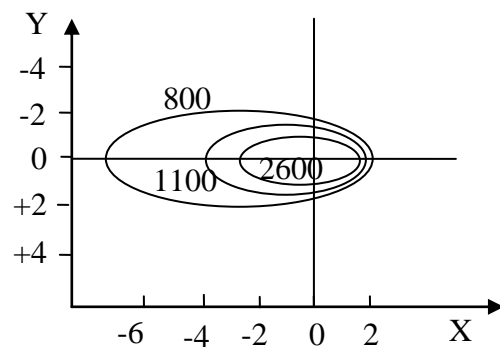
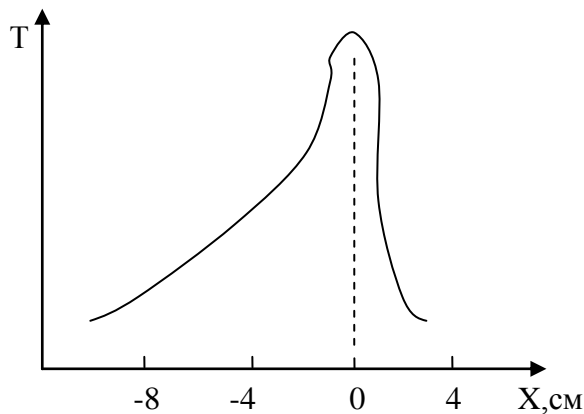
глубокий провар без перегрева наружной поверхности деталей, а также уменьшается износ электродов.

Сварочный ток, время сварки и усилие на электродах оказывают на размеры и прочность каждой точки примерно такое же влияние, как и при точечной сварке. В то же время при роликовой сварке имеется ряд особенностей, связанных с перемещением контакта электрод-деталь, подвижностью источника нагрева и значительным шунтированием сварочного тока.

Сопротивление подвижного контакта значительно выше, чем неподвижного и растёт с увеличением скорости сварки.



Вследствие подвижности источника нагрева температурное поле несимметрично относительно оси электрода.

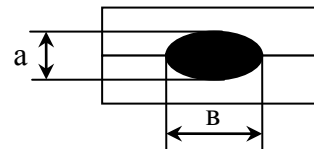
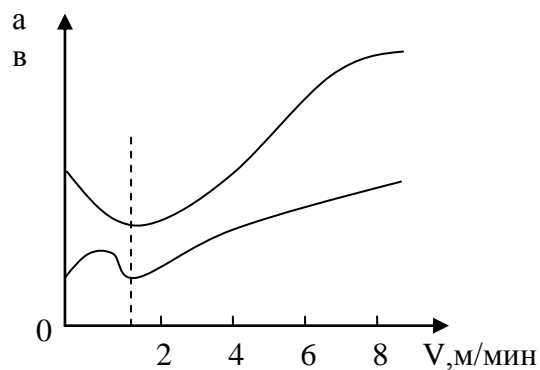


Распределение температуры при нагреве и скорость последующего охлаждения определяется погонной энергией $q/V_{св}$ (q – мощность в Дж/сек, V – скорость сварки, см/сек) и условиями охлаждения.

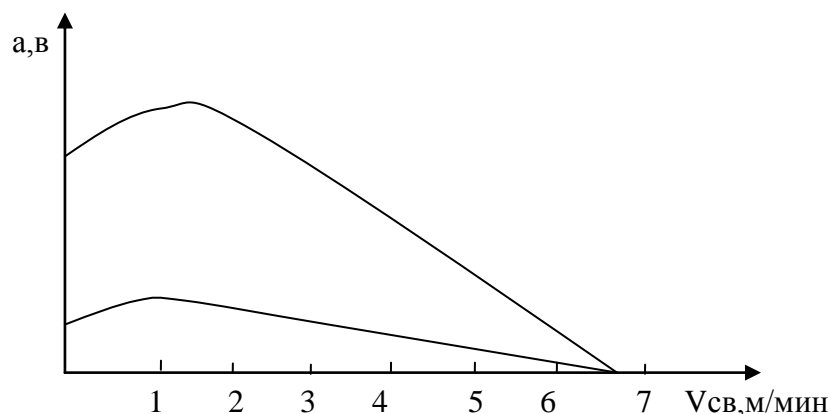
При роликовой сварке мощность q в определённых пределах растёт почти линейно с увеличением $V_{св}$ (т. к. с ростом $V_{св}$ растёт R_k , а $q = I_{св}^2 R$, т.е. при $I_{св} = \text{const}$ $q \approx R$), поэтому погонная энергия мало зависит от $V_{св}$ и она не должна оказывать влияние на

процесс нагрева. Однако $V_{св}$ очень сильно воздействует на тепловые процессы непосредственно в зоне сварки. Это влияние различно при сварке материалов с высокой и низкой тепло- и электропроводностью.

Например, при сварке дуралюминия ($\delta=1+1\text{мм}$, $t_{св}=0,1\text{сек}$, $I_{св}=19\text{ка}$, $P=250\text{кг}$) вначале с увеличением скорости от 0 до 1,65 м/мин размеры ядра несколько уменьшаются, что объясняется вдавливанием вращающихся электродов в размягчённый материал и улучшением теплоотвода. При большей скорости электроды всё время приходят в контакт с холодным металлом, вдавливания почти нет и теплоотвод в электроды незначителен, поэтому ядро проплавляется на большую глубину, а кристаллизация вследствие большой скорости перемещения деталей происходит без давления, что приводит к дефектам в ядре и сквозному проплавлению.



Обычно скорость сварки Al сплавов выбирают в пределах 0,5-3 мм/мин. При сварке стали (сталь 1Х18Н9Т $\delta=1+1\text{мм}$, $t_{св}=0,1\text{сек}$, $I_{св}=9\text{ка}$ на $P=250\text{кг}$) вначале с ростом $V_{св}$ размер ядра несколько растёт, а затем постепенно уменьшается из-за недостаточной погонной энергии.



Такая зависимость связана с тем, что при сварке аустенитной стали, металл впереди роликов обладает высоким сопротивлением пластической деформации даже при высокой температуре и вдавливание электродов в металл незначительно. Следовательно, в этом случае условия теплоотвода мало зависят от скорости сварки. Погонная энергия $q/V_{св}$ сначала несколько возрастает т.к. при малых скоростях контактное сопротивление (а значит и q) растёт быстрее, чем $V_{св}$, а при дальнейшем увеличении $V_{св}$ рост R_k замедляется и погонная энергия уменьшается, что и приводит к уменьшению проплавления.

При сварке металлов с высокой электро- и теплопроводностью большое влияние оказывает шунтирование тока. Поэтому, при сварке алюминиевых сплавов с уменьшением тока через ранее сваренные точки, размеры расплавленного ядра при этом уменьшаются.

При сварке сталей вследствие высокого удельного сопротивления металла в разогретом состоянии шунтирование незначительно. Однако, важную роль играет подогрев металла впереди зоны сварки. Поэтому с уменьшением шага точек размеры расплавленного ядра увеличиваются.

Общие особенности технологии роликовой сварки.

Детали перед сваркой подвергаются двухсторонней общей или местной (на ширине около 20 мм) очистке. Способы очистки те же что и при точечной сварке.

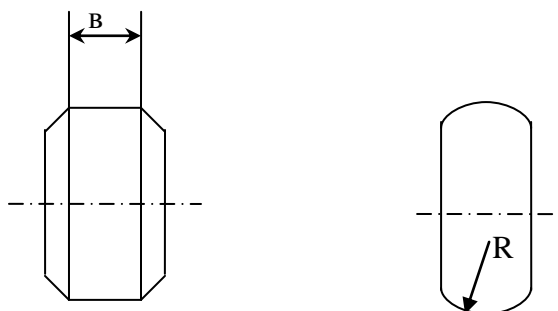
Детали собираются в специальных приспособлениях или на струбцинах. Для уменьшения коробления деталей перед сваркой их прихватывают по оси шва точками с шагом 50-100 мм, а прихватки зачищают металлической щёткой. Глубокие вмятины из-за возможных при сварке прожогов не допускаются. Небольшие детали или детали, свариваемые в приспособлениях, обычно не прихватываются.

Короткие швы обычно сваривают от одного конца к другому. Длинные - от середины к концам.

При роликовой сварке часто возникают значительные сварочные деформации. Особенно большие деформации наблюдаются при сварке сплавов с высоким коэффициентом теплового расширения (например, аустенитной стали 1X18H9T). Правка изделия по способу МВТУ им. Баумана обкаткой шва роликами в холодную почти полностью устраняет сварочные деформации.

Основными параметрами режима при роликовой сварке являются:

- 1) шаг точек a ;
- 2) усилие на электродах P ;
- 3) диаметр электродов $d_э$;
- 4) ширина рабочей части электродов b для электродов с цилиндрической рабочей частью или радиус R для электродов со сферической рабочей частью;



- 5) продолжительность импульса сварочного тока $t_{св}$;
- 6) продолжительность паузы между двумя соседними импульсами тока $t_{п}$;
- 7) скорость сварки $V_{св}$;
- 8) сварочный ток $I_{св}$;

Шаг точек для получения герметично-прочных швов выбирают в пределах $2-2,5\delta$ для сталей и около 3δ для алюминиевых сплавов.

Как и при точечной сварке с повышением усилия на электродах растёт необходимый ток и мощность, повышает стабильность качества швов.

В современной практике предпочитают большие усилия в сочетании с мощными машинами.

Если форма изделия допускает, то диаметр электродов должен быть не менее 200-250 мм ($D_{э} \geq 200-250\text{мм}$). При $D_{э} < 150\text{мм}$ увеличивается износ электродов.

При прерывистой сварке продолжительность одного цикла $t = t_{св} + t_{п}$ в секундах определяется шагом точек a (мм) и скоростью сварки (м/мин):

$$t = 0,06a / V_{св}$$

отношение $t_{св}/t$ выбирается в зависимости от свойств свариваемого материала и обычно равно 0,3-0,7. С увеличением тепло- и электропроводности материала это отношение уменьшается, так как растёт ток, необходимый для обеспечения провара, а включение значительного тока $mс$ малыми паузами вызывает недопустимый перегрев поверхности свариваемых деталей и электродов.

Продолжительность цикла сварки t , а также $t_{св}$ и $t_{п}$ на машинах переменного тока всегда выбирается кратным периоду переменного тока (0,02 сек). Осуществление сварочного цикла обеспечивается аппаратурой управления роликовых машин.

Необходимый сварочный ток зависит от толщины и материала свариваемых деталей и от скорости сварки. Как

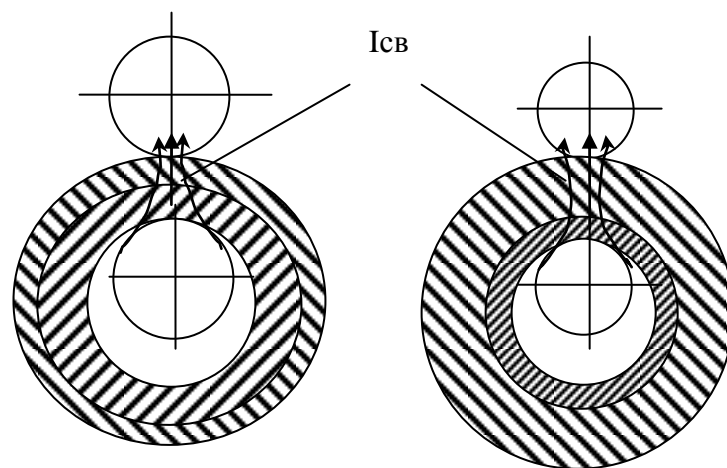
правило, ток при роликовой сварке на 20-50% выше, чем при точечной сварке аналогичных деталей.

Скорость сварки лимитируется мощностью машины, свойствами металла и условиями его кристаллизации.

Скорость прерывистой роликовой сварки обычно равна 0,5-3м/мин. В современных мощных машинах она нередко достигает 5м/мин, а иногда и 10м/мин.

Как и при точечной сварке, режим сначала ориентировочно определяют по справочным таблицам или номограммам, а затем уточняют испытанием швов на образцах из того же материала что и подлежит сварке деталей.

Условия нагрева при роликовой сварке зависят также от формы и толщины свариваемых деталей. Например, при сварке кольцевого шва между деталями различной толщины лучшие результаты получаются при размещении более тонкой детали снаружи, так как при этом выше плотность тока в контакте:



Желательно чтобы соотношение толщины свариваемых деталей не превышало 2:1.

Для улучшения условий нагрева возможно местное уплотнение одной из деталей. Иногда со стороны более тонкой детали используют электрод из менее электропроводного материала, что способствует перемещению ядра в тонкую деталь и более равномерному проплавлению деталей неодинаковой толщины.

Технология роликовой сварки сталей.

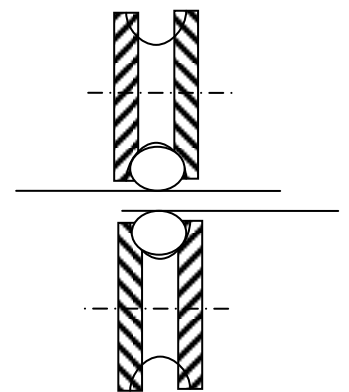
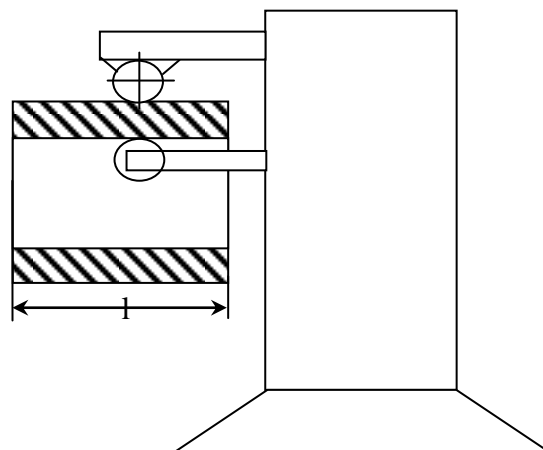
Стали обычно свариваются на машинах переменного тока прерывистым способом.

Малоуглеродистые стали хорошо свариваются роликовой сваркой, как на «мягких» так и на «жёстких» режимах. Холоднокатаные стали перед сваркой желательно обезжировать. Горячекатаные – подвергаются местной или общей механической очистке или травлению.

При выборе конкретных параметров режима учитывается форма изделия, качество сборки и очистки деталей, мощность имеющегося оборудования.

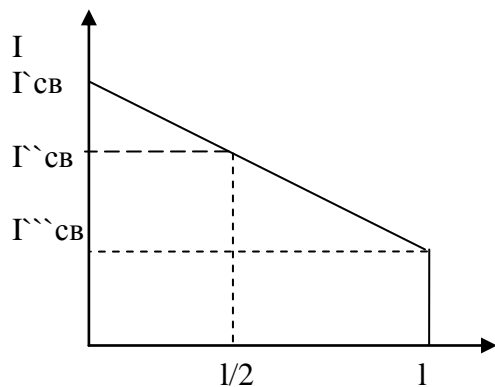
Малоуглеродистые стали с защитными покрытиями свариваются на «жёстких» режимах (для уменьшения зоны повреждения покрытия). При сварке оцинкованной стали рекомендуется применять $t_{св}/t=0,80-0,85$ с тем, чтобы цинк впереди зоны сварки поддерживался в расплавленном состоянии и вытеснялся из зазора между свариваемыми деталями. Это уменьшает выплески и улучшает качество соединения. Свинцовые, цинковые и оловянистые покрытия деталей трудно очищаются от роликов. Для устранения этого и повышения скорости сварки (до 6-14 м/мин для жести толщиной 0,5-0,6 мм) используется отоженная медная или латунная проволока диаметром 1,5-3 мм, которая непрерывно перемещается в пазах ролика.

Затруднение возникает при сварке продольных швов на изделиях из магнитной стали, вводимых в контур машины, например, при сварке продольного шва обечайки из магнитной стали.



В процессе сварки изменяется сечение магнитной стали, введённой в контур. При этом изменяется индуктивное сопротивление вторичного контура машины, а также активные потери на нагрев детали вне зоны сварки возникающими в ней

вихревыми токами и, как следствие, изменяется сварочный ток.



Если вначале сварки ток достаточен для хорошего провара, то к концу или даже к середине шва ток может уменьшиться до величины недостаточной для провара.

Для предотвращения этого пользуются следующими приёмами:

- 1) сварка шва в два приёма от середины к концам;
- 2) разбивка шва на несколько участков свариваемых на различных режимах;
- 3) автоматическое регулирование сварочного тока в процессе сварки шва;

Закаливающиеся стали (например 30ХГСА) для уменьшения скорости охлаждения свариваются на относительно мягких режимах ($t_{св}$ увеличивается примерно в 2 раза по сравнению со сваркой малоуглеродистой стали, максимальная скорость сварки не превышает 0,7-1 м/мин). Даже сварка на мягких режимах даёт хрупкие соединения (при жёстком режиме в шве появляются трещины). Хрупкость устраняется последующей термообработкой.

Аустенитные стали хорошо свариваются роликовой сваркой. Немагнитность этих сталей облегчает сварку крупногабаритных изделий, вводимых при сварке в контур машины. Из-за высокой жаропрочности и низкой электропроводности аустенитных сталей усилие на электродах увеличивается на 30-1000%, а ток уменьшается на 30-40% по сравнению с Р и $I_{св}$ при сварке таких же деталей из малоуглеродистой стали. Аустенитные стали с небольшим содержанием феррита (например, 1Х18Н9Т) хорошо свариваются

как на «жёстких» (более предпочтительных) так и на мягких режимах. Чисто аустенитные стали (например, X23H18) из-за склонности к горячим трещинам свариваются на более «мягких» режимах.

Ориентировочные режимы роликовой сварки сталей.

материал	δ , мм	I _{св} , ка	t _{св} , сек	t _п , сек	P, кН	V _{св} , м/мин	B, мм
малоуглеродистая сталь	1,0	15	0,06	0,06	4	1,75	6
	2,0	16 - 19	0,12	0,1	6,5	1,4	10
30ХГСА	1,0	10 - 12	0,14 - 0,16	0,18 - 0,24	5-6	0,6 - 0,7	6
	2,0	17 - 19	0,2 - 0,22	0,3 - 0,36	10 - 11,5	0,5 - 0,6	10
1X18H9T XH75Г XH78Г и др.	1,0	9-11	0,06 - 0,08	0,12 - 0,16	5 - 6,5	0,5 - 1,0	6
	2,0	12 - 16	0,12 - 0,16	0,24 - 0,32	10 - 13	0,3 - 0,6	10

Роликовая сварка цветных металлов и их сплавов.

Алюминиевые сплавы при толщине деталей до 1,5-2 мм можно сваривать на машинах переменного тока прерывистой сваркой ($t_{св}/t=0,3-0,4$). В связи с высокой электро и теплопроводностью алюминиевых сплавов для их сварки требуются большие токи (в 2-3 раза больше, чем для сварки малоуглеродистой стали) и, следовательно, машины значительной мощности ($N=200-400$ кВа). Для концентрации тока и уменьшения перегрева применяют электроды со сферической рабочей поверхностью при $R=40-150$ мм. Необходимое усилие на электродах растёт с увеличением прочности сплава и приближается к усилию P для малоуглеродистых сталей. Скорость сварки обычно меньше, чем при сварке стали из-за потребления большой мощности.

Режимы роликовой сварки алюминиевого сплава АМгАМ на машинах переменного тока.

δ , мм	$I_{св}$, ка	$t_{св}$, сек	$t_{п}$, сек	P , кН	$V_{св}$, м/мин
0,5	21	0,04	0,1	250	0,7
1,0	30	0,06	0,10	350	0,7
1,5	38	0,06	0,14	450	0,6
2	41	0,08	0,24	500	0,5

Качество соединений улучшается и увеличивается возможная толщина свариваемого материала (до 3-5 мм) при шаговой сварке на специальных машинах, использующих для сварки каждой точки импульс выпрямленного трёхфазного тока. Включение тока в моменты остановки роликов, а также плавное нарастание тока в импульсе обеспечивает более глубокий провар без перегрева наружной поверхности деталей и роликов, а также улучшает условия охлаждения и кристаллизации расплавленного ядра.

Режимы шаговой роликовой сварки алюминиевого сплава АМг, АМц на низкочастотной машине МШШТ-600.

δ , мм	P, кН	t _{св} , сек	I _{св} , ка	величина шага, мм	скорость сварки, точек/мин
1,0	5	0,08	43	2,5	150
2,0	7,5	0,12	55	4,0	100
3,0	700	0,16	60	5,0	70

Условия роликовой сварки **медных** сплавов определяются главным образом их электропроводностью. Сплавы с высоким удельным сопротивлением (кремнистая и фосфористая бронза) свариваются хорошо. Латунь сваривается удовлетворительно при больших токах.

Режимы роликовой сварки латуни Л62 прерывистой сваркой на машинах переменного тока.

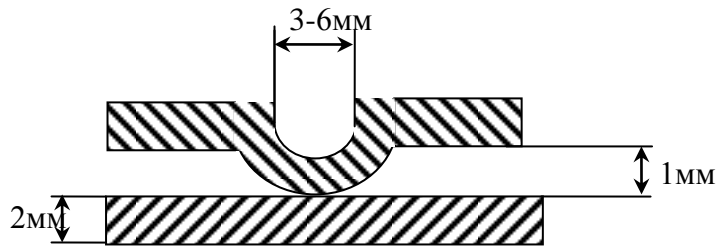
δ , мм	I _{св} , ка	t _{св} , сек	t _п , сек	P, кг	V _{св} , м/мин
0,5	19	0,06	0,06	200	0,75
1,0	27	0,08	0,10	400	0,70
1,5	36	0,12	0,14	550	0,60

Титан и его сплавы близки по своим теплофизическим свойствам к аустенитным сталям и поэтому хорошо свариваются прерывистой роликовой сваркой на обычных машинах переменного тока.

δ , мм	I _{св} , ка	t _{св} , сек	t _п , сек	P, кг	V _{св} , м/мин
1,0	6-6,5	0,12-0,14	0,18-0,24	350-400	0,7-0,8
2,0	9-10	0,20-0,22	0,32-0,40	550-650	0,5-0,6
3,0	11-12,5	0,28-0,30	0,34-0,48	900-1100	0,3-0,4

Рельефно-роликовая сварка.

При рельефно-роликовой сварке в одной из деталей перед сваркой вдоль шва выдавливается непрерывный рельеф. Концентрация тока по рельефу локализуется, и тепловыделение, и надёжная сварка достигается без глубокого проплавления.



Благодаря этому кристаллизация в зоне сварки завершается очень быстро, что позволяет резко увеличить скорость сварки. Например, малоуглеродистая сталь толщиной 2 мм сваривается со скоростью 20 м/мин при $I_{св}=70000\text{а}$, $P=1750\text{кг}$.

Дефекты и контроль качества роликовой сварки.

Роликовой сварке внахлестку и точечной сварке присущи одинаковые дефекты и контроль их качества осуществляется одинаковыми методами. Важнейшее значение имеет активный контроль процесса, сопровождаемый периодическими испытанием образцов (технологическими пробами, механическим испытанием и металлографическим исследованием). Кроме того, прочноплотные швы проверяются на герметичность, например бензобак автомобиля, испытывается сжатым воздухом при погружении в воду. Неплотность швов обнаруживается пузырьками воздуха.

Раздел 3. Оборудование для контактной сварки.

Классификация и общая характеристика машин для контактной сварки.

Контактные машины по способу сварки разделяются на стыковые, точечные, рельефные и роликовые. По принципу действия машины могут быть неавтоматическими, полуавтоматическими и автоматическими. По специализации – универсальными и специальными. По приводу – с рычажным, пружинным, механическим, электромеханическим, пневматическим, пневмогидравлическим или гидравлическим. По способу питания – однофазные или трёхфазные, переменного или постоянного тока, низкочастотные и с накоплением энергии. По способу установки – стационарными и передвижными.

На контактной машине, работающей автоматически, подача, закрепление и сварка деталей производится без участия человека; на полуавтоматической – установка и перемещение деталей осуществляется вручную; на неавтоматической машине обычно автоматизировано только включение и выключение тока.

Область применения машины соответствующего типа определяется энергетическими возможностями предприятия, конструкцией свариваемых деталей, требованиями к качеству и видом производства.

Универсальные машины применяются для сварки различных, а специальные – для сварки однотипных деталей.

В массовом производстве целесообразны специализированные автоматически работающие машины, а в мелкосерийном и индивидуальном производствах – универсальные с устройствами для быстрой их переналадки.

Большинство машин устанавливается стационарно; переносными и передвижными являются лишь некоторые специализированные машины.

Все машины для контактной сварки состоят из двух взаимосвязанных частей: механической и электрической. Механическая часть машины представляет собой более или менее сложный станок для закрепления, сжатия и перемещения свариваемых деталей с органами управления и устройствами для регулирования основных механических параметров (усилие зажатия и осадки, скоростей перемещения и т.д.). Часто элементы этих механизмов проводят сварочный ток.

Электрическая часть машины обычно состоит из:

сварочной цепи (сварочного контура), подводящей ток от источника питания к электродам;

источника питания (в большинстве машин однофазного сварочного трансформатора),

аппаратуры управления, обеспечивающей заданную последовательность и продолжительность всех или части операций сварочного цикла, а также регулирующей основные электрические параметры процесса (мощность, напряжение, форму кривой тока).

Мощность и режим работы контактных машин.

Для осуществления сварки за время $t_{св}$ в сварочной цепи машины должен протекать заданный ток I_2 . Мощность, развиваемая при этом на участке цепи между электродами (в зоне сварки):

$$N_{св} = I_2^2 R_{св}$$

При этом полная кажущаяся мощность, забираемая машиной из сети:

$$N = I_2^2 Z \frac{1}{\eta_{тр}} = I_2^2 \sqrt{(R_{св} + R_{вн})^2 + X_{L\phi}^2} \frac{1}{\eta_{тр}},$$

где $R_{вн}$ – активное сопротивление сварочного контура машины;

$X_{L\phi}$ – его реактивное сопротивление;

Z – полное сопротивление сварочного контура и свариваемых деталей;

$\eta_{тр}$ - КПД трансформатора (обычно более 0,95).

Мощность, необходимая для сварки заданных деталей непостоянна и зависит от конструкции машины: чем больше её внутреннее сопротивление $Z_{вн} = \sqrt{R_{вн}^2 + X_{L\phi}^2}$, тем больше необходимая мощность.

Для нормальной работы машин необходимо, чтобы сварочный трансформатор обеспечивал протекание сварочной цепи заданного тока $I_2 = E_2 / Z$ (где E_2 – эдс вторичной обмотки трансформатора) и выделение в зоне сварки необходимой мощности $N_{св}$.

Кроме того, необходимо, чтобы при этом трансформатор и элементы сварочного контура не перегревались. Нагрев зависит от режима работы машины, определяемого продолжительностью её включения ПВ (в %).

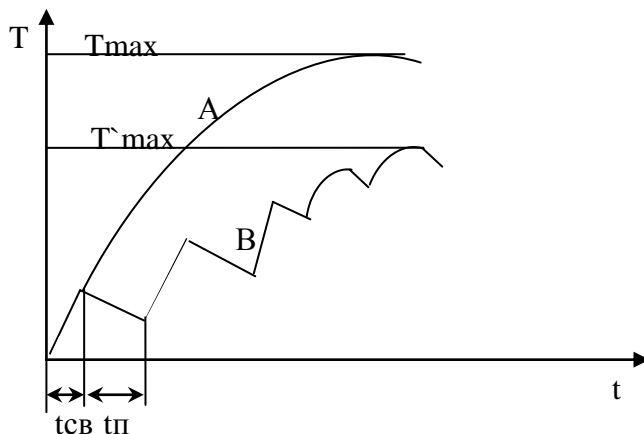
$$ПВ = \frac{\sum t_{св}}{\sum t_{св} + \sum t_{п}} \cdot 100\%$$

ПВ определяется за 5 мин и представляет собой отношение общей длительности протекания тока $t_{св}$ к сумме $t_{св}$ и пауз $t_{п}$. Величина ПВ зависит от назначения машины. Обычно она равна:

для стыковых машин 5-50%,

для точечных 1,2-32%,

для роликовых 32-80%.



При непрерывной работе (ПВ=100%) температура в любом нагреваемом элементе нарастает по экспоненциальному закону (кривая A) и достигает некоторого установившегося значения T_{max} . При том же токе, но

прерывистом включении, температура этого элемента будет изменяться по кривой B и достигнет установившегося значения $T'_{max} < T_{max}$.

Если при непрерывной работе T_{max} не превышает допустимых пределов, то соответствующие этим условиям ток и мощность называются *током продолжительной работы* $I_{пр}$ и *продолжительной мощностью* $N_{пр}$.

Количество тепла, выделяемого в любом элементе машины с сопротивлением R за время $t=t_{св}+t_{п}$ при непрерывной работе ($ПВ=100\%$), равно $I_{пр}^2 R t$. При прерывистом включении за то же время t будет выделено количество тепла равное $I_{кр}^2 R t_{св}$, где $I_{кр}$ – ток при повторно кратковременной работе (кратковременный ток).

Одинаковый нагрев при непрерывной и повторно кратковременной работе будет получен при:

$$I_{пр}^2 R t = I_{кр}^2 R t_{св}$$

Отсюда:

$$I_{кр} = I_{пр} \sqrt{\frac{t}{t_{св}}} = I_{пр} \sqrt{\frac{100}{ПВ}}$$

По аналогии:

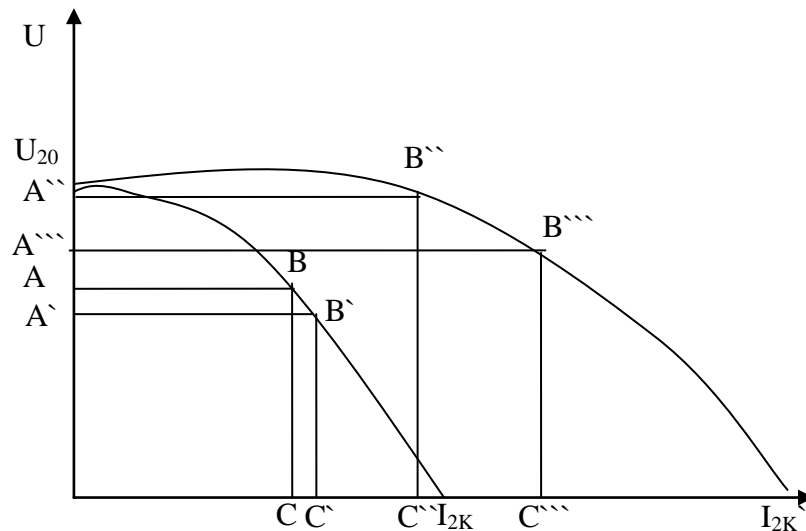
$$N_{кр} = N_{пр} \sqrt{\frac{100}{ПВ}}$$

В паспорте машины обычно указывается номинальный режим работы ($ПВ_{ном}$) и номинальная мощность ($N_{ном}$), которые при $ПВ_{ном}$ не вызывает перегрева элементов машины. Если известны $N_{ном}$ или $ПВ_{ном}$, легко определить допустимую кратковременную мощность $N_{кр}$, не вызывающую перегрева при любом другом $ПВ$.

$$N_{кр} = N_{ном} \sqrt{\frac{ПВ_{ном}}{ПВ}}$$

Внешние характеристики контактных машин.

Зависимость между напряжением на электродах U_2 и сварочным током I_2 называется внешней характеристикой машины.



При холостом ходе ($R_{св}=\infty$) $I_2=0$ и $U_{20}=E_2$ (E_2 – эдс вторичной обмотки трансформатора; обычно $E_2=1-24$ в). При коротком замыкании $I_2=I_{2K}$ и $U_2=0$. При заданном U_{20} ток короткого замыкания (I_{2K}) будет тем больше, а внешняя характеристика тем положе, чем меньше полное сопротивление сварочного контура $Z_{вн}$, так как $I_{2K}=U_{20}/Z_{вн}$.

Внешняя характеристика позволяет судить о некоторых особенностях машины и о её пригодности для выполнения заданной сварочной операции. Площадь прямоугольника $OABC$ пропорциональна полезной мощности $N_{св}=I_2 U_2=I_2^2 R_{св}$.

Если по какой-либо причине изменяется $R_{св}$, в результате чего изменяются также I_2 и U_2 , то значения $N_{св}$ определится площадью $OA'B'C' \neq OABC$.

При крутопадающей характеристике незначительное смещение точки В и В' не вызывает большого изменения площади прямоугольника – при изменении условий сварки полезная мощность мало изменится. При малой характеристике смещение В'' в В''' вызовет резкое изменение $N_{св}$. Поэтому при точечной и роликовой сварке, когда для получения соединений стабильного качества желательно, чтобы количество тепла, выделяемого в зоне сварки мало изменилось при изменениях $R_{св}$, целесообразны машины с крутопадающей характеристикой. Наоборот, при стыковой сварке оплавлением лучше пологопадающая характеристика, при которой уменьшение сопротивления сварочной цепи в момент образования перемычки между оплавленными торцами деталей ведёт к резкому увеличению тока, что ускоряет нагрев и разрушение перемычки – оплавления идёт устойчивее. Следует отметить, что ввиду наличия в сварочной цепи индуктивного сопротивления $X_{L_{BH}}$ – ток при изменении её параметров изменяется не мгновенно, достигает своего установившегося значения, соответствующего значению U_2 и I_2 по внешней характеристике, тем скорее, чем меньше постоянная времени сварочной цепи:

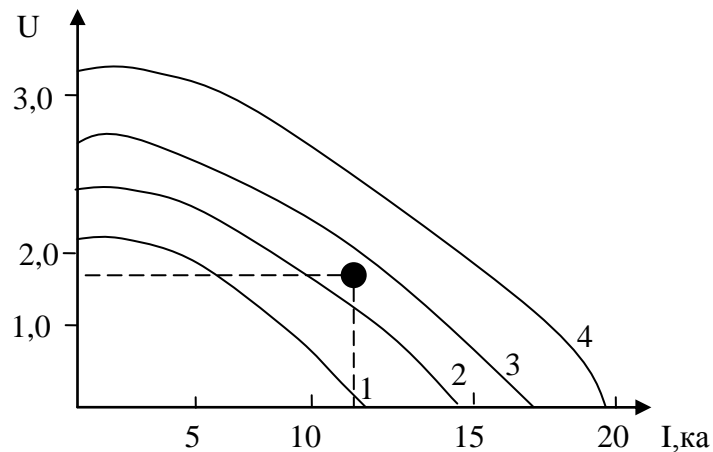
$$\tau = \frac{R_{св} + R_{BH}}{X_{L_{BH}}}$$

постоянная времени уменьшается с уменьшением $X_{L_{BH}}$, поэтому для быстрого разрушения перемычек важна не только пологая характеристика (малое R_{BH}), но и малое индуктивное сопротивление ($X_{L_{BH}}$).

Если известны сопротивление $R_{св}$ и требуемый для сварки ток I_2 , то по внешним характеристикам машины можно определить её пригодность для выполнения данной операции.

Пример:

Внешние характеристики машины

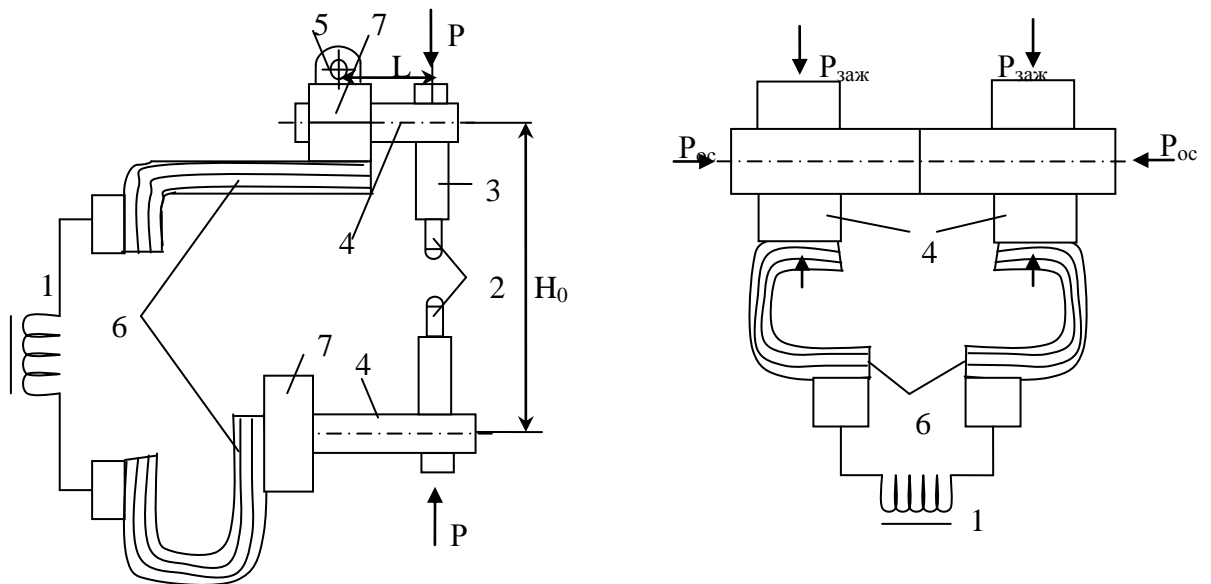


Известно, что $R_{св}=100\text{мком}$, а необходимый ток $I_2=12000\text{а}$, тогда напряжение $U_2=R_{св} I_2=1,2\text{в}$. По внешним характеристикам определяем, что данный режим обеспечивается машиной с характеристикой 3.

Общие узлы контактных машин.

Сварочный контур контактных машин.

Элементы, соединяющие источник питания (трансформатор) с электродом образует сварочный контур машины.



Сварочный контур обычно состоит из:

- а) электродов 2, непосредственно подводящих ток к свариваемым деталям и передающих необходимые усилия для их обжатия. Иногда (в роликовых машинах) электроды служат и для перемещения детали.
- б) электрододержателей 3 для закрепления электродов.
- в) хоботов (в точечных и роликовых машинах) или контактных плит (в стыковых машинах) 4, соединённых с механизмами, осуществляющими сжатие деталей с необходимым усилием P ($P_{ос}$).

Под действием сил P хобот вместе с электрододержателем перемещается для сближения электродов поступательно (в машинах с прямолинейным ходом) или поворачивается вокруг шарнира 5 (в машинах с радиальным ходом)

г) гибких шин 6, связывающих колодки вторичного витка трансформатора с подвижными элементами контура. В машинах

малой мощности вторичный виток трансформатора иногда делается гибким из медной фольги и может непосредственно соединиться с держателями хоботов 7 без промежуточных шин.

Между элементами сварочного контура имеются неподвижные или подвижные контакты (при роликовой сварке держатель жёстко связанный с электродом роликом вращается).

Размеры контура (полезный вылет L_0 и раствор H_0) ограничивают габариты изделий, которые могут быть сварены с их введением в контур машины. Так как с увеличением L_0 и H_0 быстро растёт внутренне сопротивление машины и падает её КПД и $\cos \varphi$, в универсальных машинах обычно вылет не превышает 800-1000 мм, а раствор – 200-400 мм. Однако в некоторых специальных машинах вылет достигает 3000 мм.

Все элементы сварочного контура, как правило, изготавливаются из меди и её сплавов с достаточно высокой электропроводностью и прочностью. Их сечение и взаимное расположение должны быть такими, чтобы при протекании заданного тока и номинальном ПВ не было чрезмерных потерь на внутреннем сопротивлении контура и перегрева его элементов, а также обеспечивалась необходимая внешняя характеристика машины.

Значительную часть активного сопротивления контура составляет сопротивление его контактов. В эксплуатации расслабление их затяжки и окисление могут резко изменять сопротивления машины. Поэтому контакты периодически разбираются и очищаются (при интенсивной работе – ежемесячно) и систематически подтягиваются.

Силовые элементы контура должны обладать достаточной прочностью и жёсткостью, а электроды и подвижные контакты также износостойкостью. Электрододержатели и хоботы должны допускать быструю смену электродов. Очень важна маневренность элементов контура, расширяющая возможность использования машины для сварки узлов сложной формы. Маневренность наибольшая если хоботы можно выдвигать (изменять вылет L_0), раздвигать (изменять H_0) взаимно смещать в горизонтальной плоскости и, наконец, поворачивать вокруг своей продольной оси.

Станина и привод контактных машин.

Станина (или корпус) делается сварной, а иногда для уменьшения потерь энергии от магнитных потоков рассеивания литой из немагнитного чугуна или сплавов алюминия. Жёсткость станины, воспринимающей усилие сжатия деталей, должна быть достаточной для предотвращения недопустимого смещения электродов или роликов, неравномерного сжатия рельефов или искривления стыкуемых деталей.

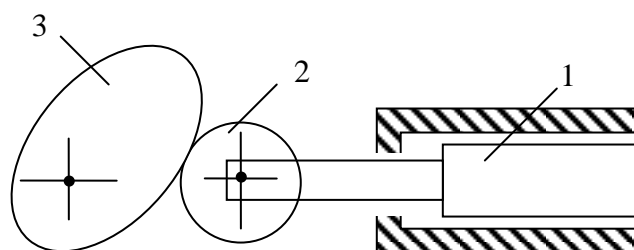
Привод у точечных и рельефных машин перемещает электроды или плиты и сжимает детали, у шовных – вращает ролики и сжимает ими детали, а у стыковых – вначале медленно сближает, а затем быстро сдавливает зажатые в губках детали.

В маломощных машинах обычно применяют ручной, ножной, пружинный, механический, электромагнитный; в машинах средней мощности – пневматический и пневмогидравлический, иногда электромеханический; в машинах большой мощности – гидравлический. В массовом производстве широко применяется пневматический привод.

Ручной рычажный привод иногда применяют при подогреве, оплавлении и осадке в стыковых машинах мощностью до 75 кВА (МС-1202, МС-1602). Система рычагов служит для увеличения усилия в стыке. Обычно подвижная плита снабжена указателем, который при перемещении плиты движется вдоль шкалы и по ней контролируется укорочение деталей при подогреве, оплавлении и осадке.

Маломощные стыковые машины иногда снабжаются пружинным приводом, сжимающим детали при подогреве и осадке (МС-201, МС-202).

В электромагнитном приводе усилие сжатия создаётся электромагнитом при включении его катушки в питающую сеть или в цепь сварочного тока.



В стыковых машинах средней мощности для оплавления и осадке часто применяется электромеханический привод. Такой привод имеет электродвигатель с регулируемой или нерегулируемой скоростью вращения и систему зубчатых и червячных передач. Например, в стыковой машине МСМУ-150 подвижную плиту перемещает ползун 1 от кулачка 3 через опорный ролик 2. кулачок вращается от асинхронного электродвигателя через текстурную передачу с вариантом (как в машине МШП-100) сменные шестерни и червячную передачу.

Электромеханический привод сжатия роликов имеет также некоторые маломощные роликовые машины (например, МШМ-25).

Ролик в шовных машинах приводится во вращение через зубчатые и червячные передачи от электродвигателя или непосредственно от специального электродвигателя.

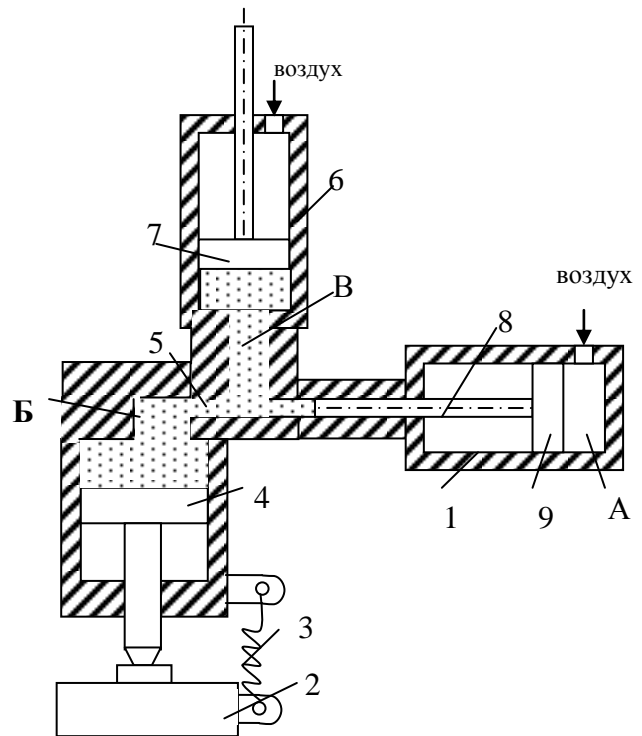
В большинстве точечных и роликовых машин для подъёма и опускания верхнего электрода и сжатия деталей используется пневматический привод, основной частью которого является поршневой цилиндр со штоком и поршнем. Подача воздуха в камеру цилиндра осуществляется с помощью электромагнитного пневматического клапана.

Конструкция и принцип работы пневмопривода обычно аналогично приводу машин МТП-100 или МШП-100. В некоторых машинах используется дисфрагменный пневмопривод.

Пневмопривод применён в машинах: точечных – МТ-602, МТ-1605, МТ-1609, МТ-4001, МТПТ-600; роликовых – МШ-1001, МШ-2001, МШП-200; стыковых – МС-1604, и других.

В мощных стыковых точечных машинах иногда используется пневмогидравлический привод (МСЛ-300, МТПГ-150-2).

Воздух, поступающий в пневмоцилиндр 6, воздействует через поршень 7 на жидкость 5, которая через поршень 4 ускоренно опускает плиту 2. после предварительного зажатия деталей сжатый воздух ($4-6 \text{ кг/см}^3$) поступает в полость А цилиндра 1. При этом шток 8 поршня 9 перекрывают полость В и создаёт высокое давление в полости Б. Этим давлением через поршень 4 сдавливаются детали. Плита 2 возвращается в исходное положение пружины 3.



В мощных стыковых машинах (МСГУ-500) а также в рельефных машинах применяется гидравлический привод. В гидравлическом приводе цилиндры обычно работают при высоких давлениях жидкости (150-200атм) и имеют значительно меньшие размеры, чем в пневматическом приводе. Гидравлический привод при качественном изготовлении гидроаппаратуры весьма надежен в работе и быстроходен.

Некоторые стыковые машины имеют смешанный привод – электромеханический при оплавлении и пневматический, пневмогидравлический или гидравлический при осадке (МС-2501, МСЛ-300).

Преобразователи энергии (источники питания).

1. Трансформаторы.

В большинстве контактных машин источником питания является однофазный трансформатор, преобразующий энергию сетевого напряжения в энергию необходимую для контактной сварки.

Основными параметрами трансформатора являются:

- а) первичное напряжение (напряжение питающей сети 380в; и 220в)
- б) частота тока (обычно 50Гц, в отдельных случаях 3-10Гц)
- в) вторичное напряжение U_{20} (обычно U_{20} лежит в пределах 1-24в)
- г) номинальная мощность $N_{ном}$ (наибольшее распространение имеют машины с трансформаторами мощностью от нескольких сот ватт до 300кВА. Иногда мощность трансформаторов достигает 1000 кВА и выше.
- д) номинальная продолжительность включения ПВ_{ном}.

Вследствие низкого U_{20} вторичная обмотка сварочных трансформаторов имеет всего 1 или (при $U_{20}=20-24$ в) два последовательных витка. В идеальном трансформаторе условно допускается, что сопротивление первичной и вторичной обмотке равна 0, отсутствуют потери в сердечнике (на чистерезис и вихревые токи) и отсутствует магнитное рассеивание, то есть весь магнитный поток, создаваемый обмотками трансформатора полностью замыкается через сердечник и одновременно пронизывает обе обмотки. У идеального трансформатора КПД равен 1 и для него справедливы следующие соотношения:

$$U_1=E_1=4,44fW_1 \Phi_m$$

$$U_2= E_2=4,44fW_2 \Phi_m$$

$$U_1/U_2=W_1/W_2=n$$

$$W_2=1, n=W_1$$

где: U_1 – напряжение сети.

U_2 – напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора.

E_2 и E_1 – ЭДС первичной и вторичной обмотки.

W_1 и W_2 – число витков первичной и вторичной обмотки.

Φ_m – амплитудное значение магнитного потока.

n – коэффициент трансформации.

F – частота тока.

В реальном трансформаторе частота индукционных линий магнитного потока замыкается, минуя сердечник и образуя магнитные потоки рассеяния. Поток рассеяния создает индуктивное сопротивление обмоток реального трансформатора. Наличие активного и реактивного сопротивления обмоток приводит к дополнительному падению напряжения внутри этих обмоток ($E_1 < U_1$; $U_2 < E_2$). При разомкнутой вторичной цепи ($I_2 = 0$) в первичной обмотке протекает ток холостого хода I_{10} . Ток холостого хода геометрически складывается из реактивного намагничивающего тока и активного тока, вызываемого потерями энергии в сердечнике гистерезиса и вихревых токов. В современных трансформаторах для контактной сварки ток холостого хода обычно не превышает 10% от рабочего тока.

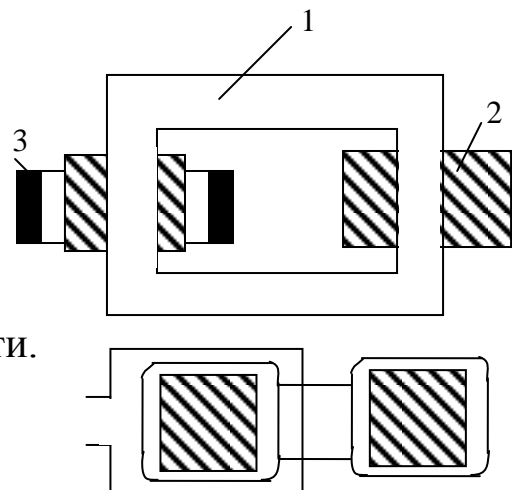
Конструкция трансформаторов.

В машинах для контактной сварки применяются три типа трансформаторов с различными сердечниками: стержневой, броневой и кольцевой. *Стержневой трансформатор* прост в изготовлении, но имеет большие потоки рассеяния и низкий КПД, применяется редко и только в машинах малой мощности.

1 – сердечник.

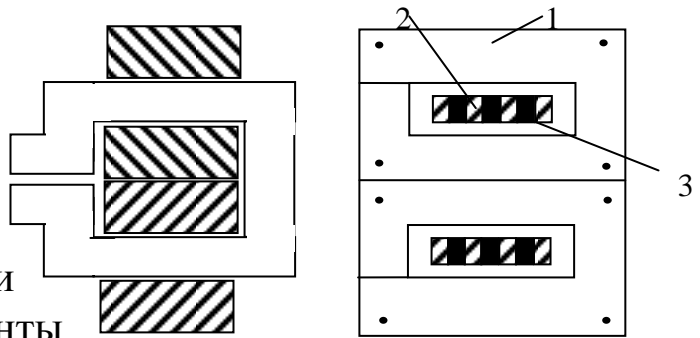
2 – первичная обмотка.

3 – вторичный виток.



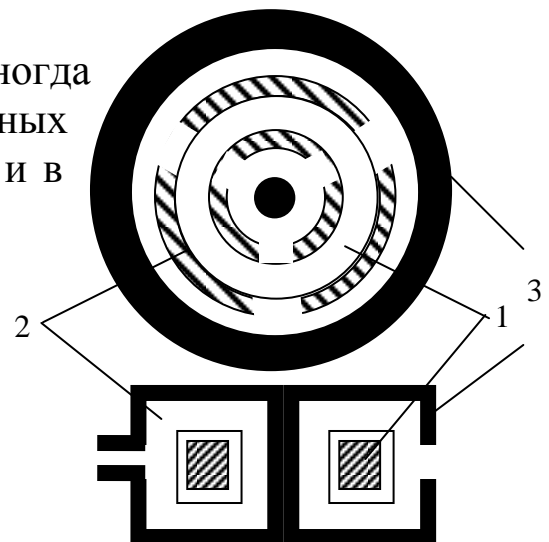
Броневой трансформатор.

На среднем стержне сердечника размещены чередующиеся элементы вторичного витка и секции первичной обмотки. Элементы вторичного витка штампуются из медного листа, по периферии к каждому витку припаивается трубка водяного охлаждения. Броневые трансформаторы для контактных машин получили наибольшее распространение для уменьшения потерь энергии на вихревые токи сердечник трансформатора набирается из полос электротехнической стали, толщиной 0,3-0,5 мм, изолированных друг от друга бумагой или лаком.



Кольцевой трансформатор.

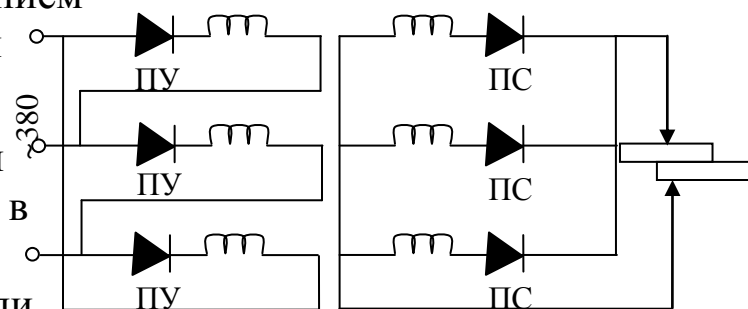
Кольцевые трансформаторы иногда применяются в специализированных стыковых машинах для сварки труб и в трубосварочных станках.



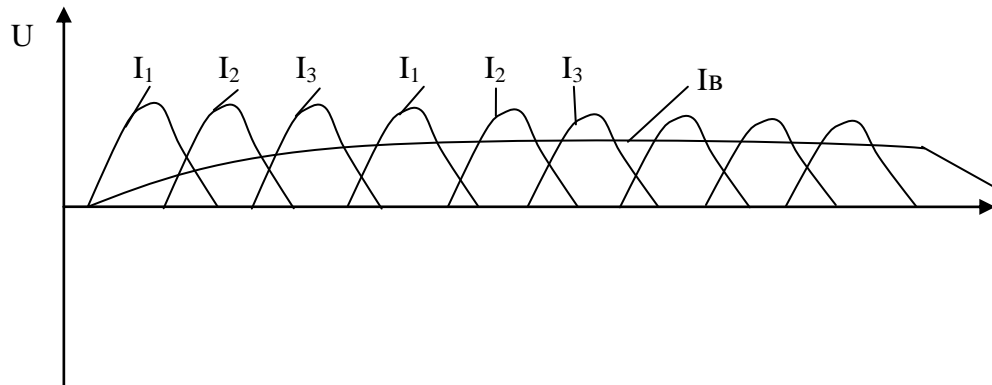
2. Схемы питания низкочастотных машин и машин с выпрямлением тока.

В машинах с выпрямлением тока используется трёхфазный трансформатор.

Первичные обмотки трансформатора включены в сеть через управляемые вентили ПУ (игнитроны или тиристоры), длительность включения которых определяет

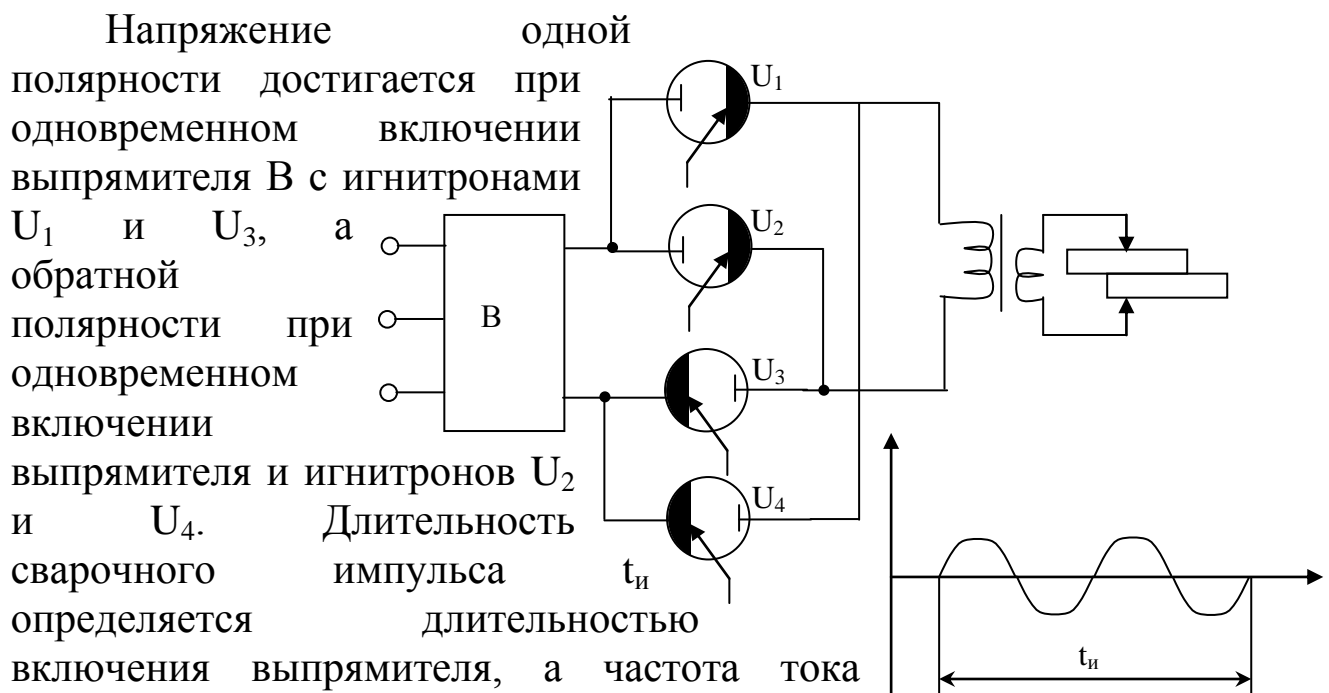


длительность импульса. Импульс выпрямляемого тока I_B получается путём подачи в первичную цепь пакета импульсов трёхфазного напряжения одной полярности.



Большая индуктивность сварочного контура машины сглаживает пульсации выпрямленного тока. Такая система питания при большом сварочном контуре существенно снижает потребляемую из сети мощность. Так, для примерно одинаковых условий сварки машины с выпрямленным током потребляют 480 кВА, а однофазная 2750 кВА. Эта система использована в мощных точечных машинах МТВ-63, МТВ-80, шовных МШВ-16, МШВ-63, а также в рельефных МРВ-63, МРВ-40, МРВ-80.

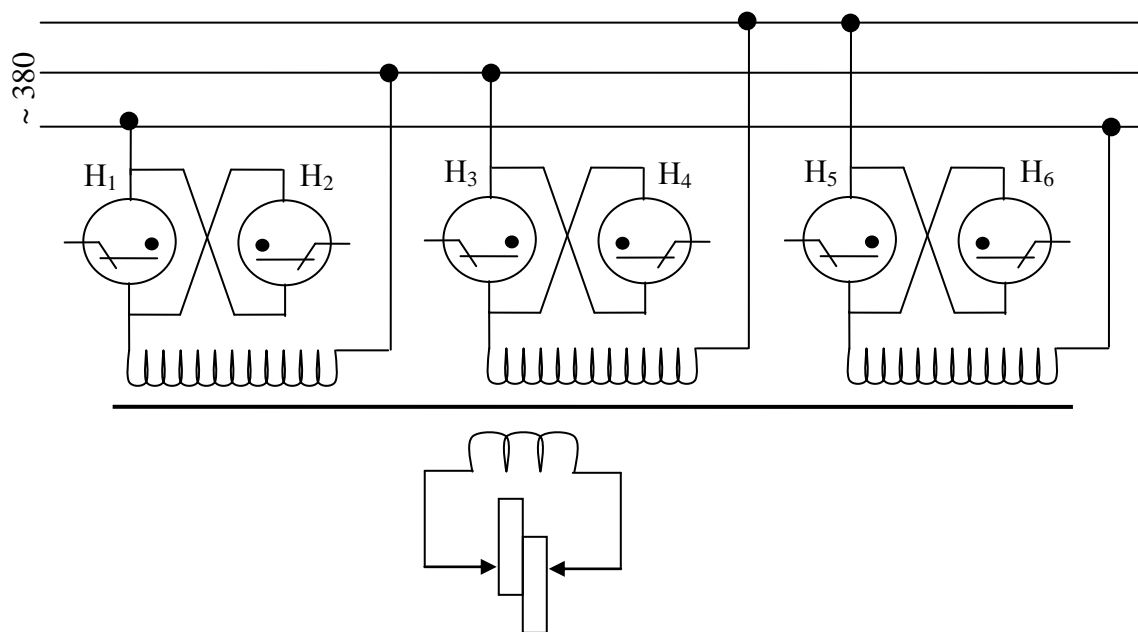
В низкочастотных машинах частота преобразуется поочерёдной подачей на сварочный трансформатор импульсов выпрямлённого напряжения противоположной полярности.



частотой включения игнитронов.

В точечных машинах для сварки лёгких сплавов одним импульсом производительностью до 50 точек в минуту вместо игнитронов применяют механические контакторы, включаемые без сварочного тока электромагнитным или пневматическим приводом.

В низкочастотных машинах используют также схемы преобразования с трёхфазным трансформатором, в которых игнитроны U_1 ; U_3 и U_5 включаются специальной схемой управления со смещением в 120° и пропускают поочередно ток через первичные обмотки трансформатора ТС, так чтобы магнитные потоки складывались



Если включены игнитроны U_2 , U_4 , U_6 , то к обмоткам прикладывается напряжение обратной полярности и в сварочном контуре индуцируется ток обратного напряжения.

Трёхфазный выпрямитель обеспечивает равномерную загрузку фаз и снижает при малом индуктивном и активном сопротивлении контура потребляемую мощность.

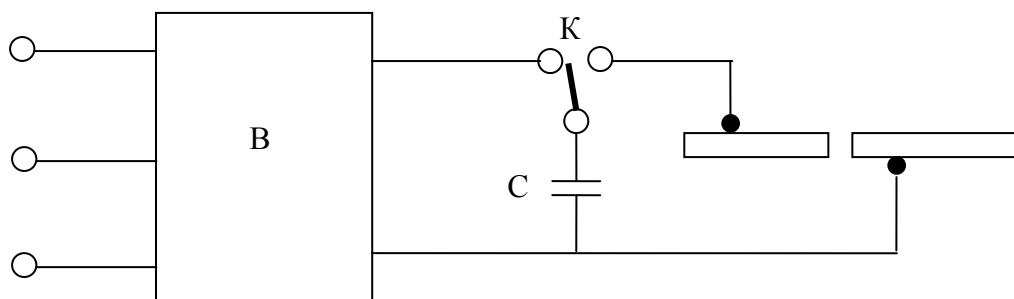
Импульсные схемы питания.

Импульсными называются схемы питания, в которых энергия, потребляемая от сети, расходуется на сварку не непосредственно (через понижающий трансформатор), а преобразуется в импульс специальной формы. Такие схемы обязательно имеют накопитель энергии, в котором запасается строго дозированное заранее заданное количество энергии. Таким накопителем обычно является электростатическое поле конденсаторов или электромагнитное поле сердечника специального трансформатора.

Главное преимущество импульсных схем состоит в том, что необходимая для сварки энергия забирается из сети медленно, то есть при малой потребляемой мощности, а расходуется быстро механически оптимальной мощности, а также имеется возможность строгого дозирования энергии расходуемой на одну сварку.

Основная область применения импульсных схем – сварка деталей малой толщины и сплавов с высокой электро- и теплопроводностью.

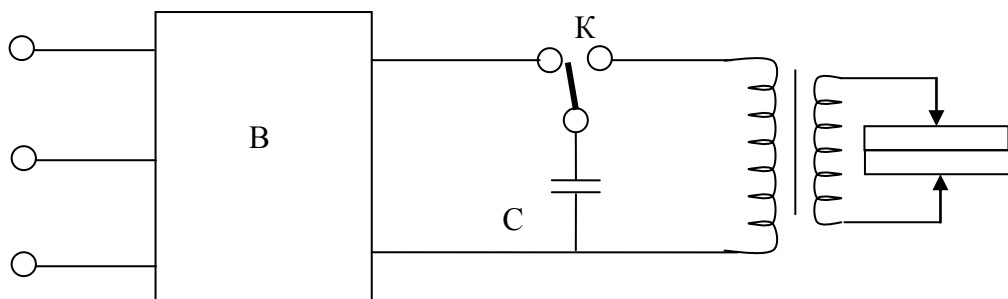
Чаще всего в качестве накопителя энергии используется батарея конденсаторов. Существует две схемы конденсаторной сварки: бестрансформаторная и с понижающим трансформатором. Бестрансформаторная схема применяется для стыковой сварки оплавлением.



При левом положении ключа К батарея конденсаторов С заряжается от высоковольтного источника постоянного тока, которым может быть выпрямитель или специальный генератор.

После окончания зарядки ключ переводится в правое положение, и конденсатор разряжается при быстром сближении деталей. При протекании через свариваемые детали мощного кратковременного импульса тока (длительностью $(4-10)10^{-4}$ сек) торцы деталей оплавляются, а затем осаживаются и свариваются.

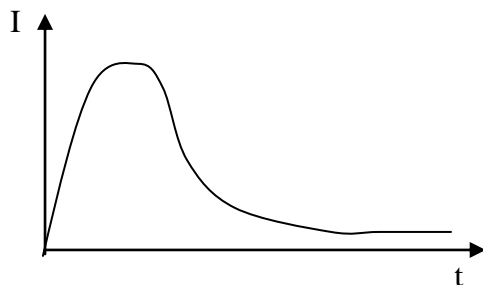
При роликовой и точечно-конденсаторной сварки обычно применяется схема с понижающим трансформатором, так как в этом случае необходимо, чтобы при малом сопротивлении деталей зажатых между электродами машины в зоне сварки выделялось достаточное количество тепла, то есть необходимо, чтобы в сварочной цепи протекал большой ток при невысоком напряжении.



Форма кривой разрядного тока зависит от соотношения индуктивности сварочной цепи, её активного сопротивления и ёмкости конденсаторов.

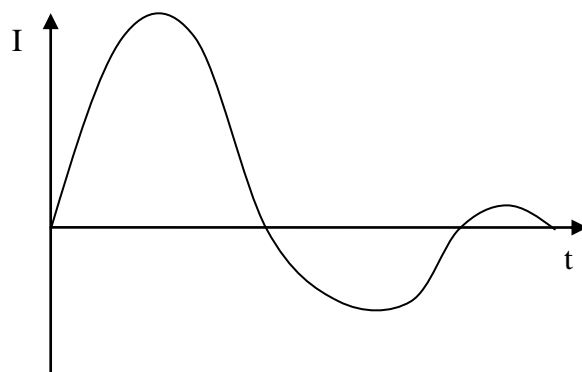
При

$$R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$$



разряд конденсаторов будет аperiodическим (R и L омическое сопротивление и индуктивность сварочной цепи, приведённые к первичной цепи трансформатора $R=n^2R_2$; $L=n^2L_2$ n – коэффициент трансформации).

При $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ разряд конденсаторов будет носить колебательный характер.



В машинах для контактной конденсаторной сварки соотношение R , L и C обычно выбирается таким чтобы обеспечивался колебательный разряд, при котором основная часть энергии выделяется в течение первой полуволны. Иногда при большом сопротивлении в зоне сварки, разряд становится апериодическим.

Количество энергии запасаемой батареей конденсаторов определяется по формуле:

$$W = CU^2/2 \quad (1)$$

где c – ёмкость батареи конденсаторов;

U – напряжение зарядки конденсаторов.

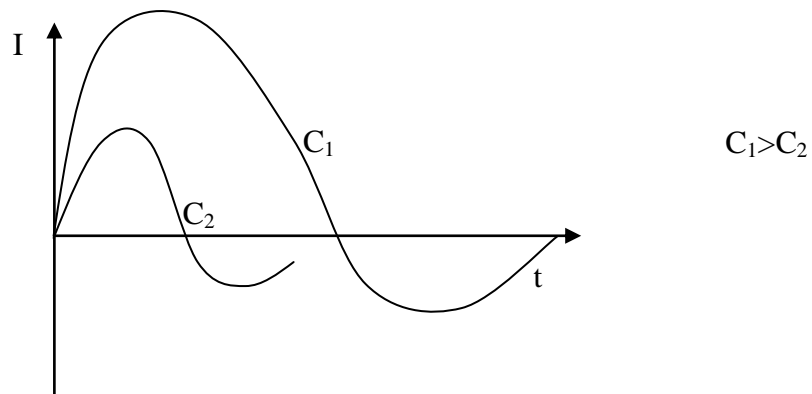
Поэтому целесообразно применение высоких напряжений зарядки конденсаторов.

Напряжение зарядки ограничивается условиями безопасности. При накоплении небольшой энергии (0,1-0,2 кВт сек) напряжение не превышает 1000в. Если оно выше, то применяют промежуточные трансформаторы, понижающие напряжение на сварочном трансформаторе. Машины с энергией до 1квтсек питаются от однофазной сети (например, ТКМ-7). Более мощные машины (например, МТК-75 с энергией до 22квтсек) от трёхфазного зарядного трансформатора через выпрямитель при стабилизации напряжения зарядки. Из формулы (1) видно, что величины энергии накапливаемой в конденсаторах можно регулировать изменением ёмкости батарей конденсаторов или изменением напряжения их зарядки.

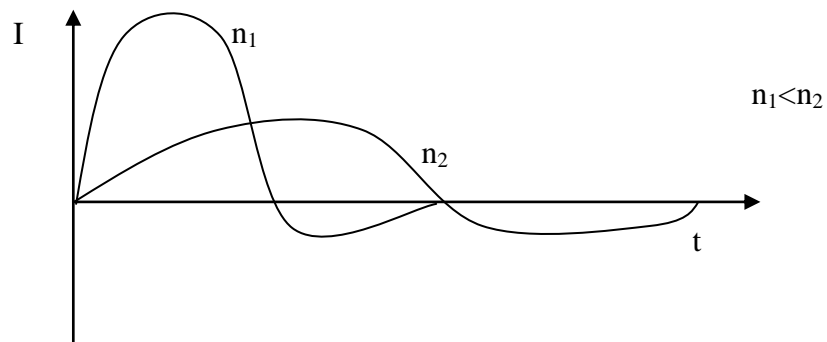
В большинстве машин энергию необходимую для сварки устанавливают, изменяя ёмкость конденсаторов.

Форму кривой разрядного импульса можно изменять изменением ёмкости конденсаторов, напряжения их зарядки и коэффициента трансформации.

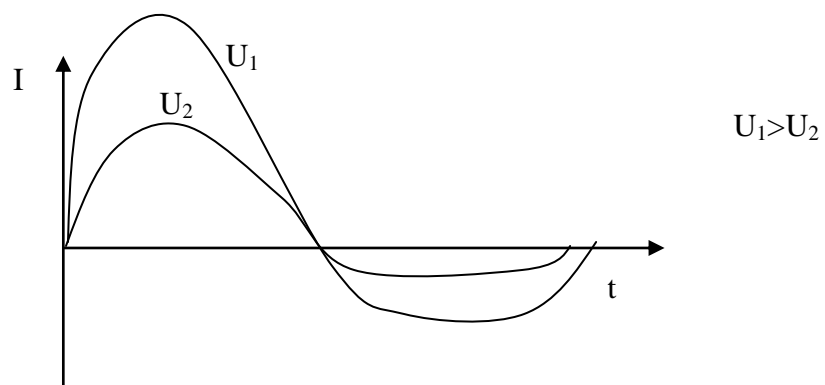
При увеличении ёмкости конденсаторов возрастает амплитуда разрядного тока и длительность импульса.



При увеличении коэффициента трансформации уменьшается амплитуда разрядного тока и за счёт этого увеличивается длительность импульсов (энергия импульсов от n не зависит).



При увеличении напряжения зарядки конденсаторов возрастает амплитуда импульса, а его длительность остаётся без изменения.



Аппаратура управления машин для контактной сварки.

Работа электрических, механических, пневматических и гидравлических устройств машины управляет электрическая, пневматическая и гидравлическая аппаратура. Аппаратура управления осуществляет включение выключение различных устройств машины в заданной последовательности, иногда контролируя или регулируя основные параметры процесса.

Включение и выключение тока осуществляется контакторами или специальными прерывателями. Пневматическая аппаратура управления состоит из клапанов, редукторов, лубрикаторов и др.

Контакторы.

В контактных машинах применяются асинхронные и синхронные контакторы. Асинхронные контакторы включают и выключают переменный ток в произвольный момент времени, не связанный по фазе с синусоидой тока. Более совершенные синхронные контакторы включают ток в заданной точке синусоиды, а выключают ток только при его нулевом значении.

Иногда асинхронные контакторы, включающие ток в произвольной точке синусоиды, а выключающие ток при его переходе через нуль, называются полусинхронными. Трансформатор и в особенности сварочный контур обладает большой индуктивностью, поэтому при их включении на синусоидальное напряжение токи в первичной и сварочной цепях достигают своих установившихся значениях не сразу, а только после окончания колебательного переходного процесса. Характер и амплитуда этих колебаний зависит от того, в какой точке синусоиды осуществляется включение тока.

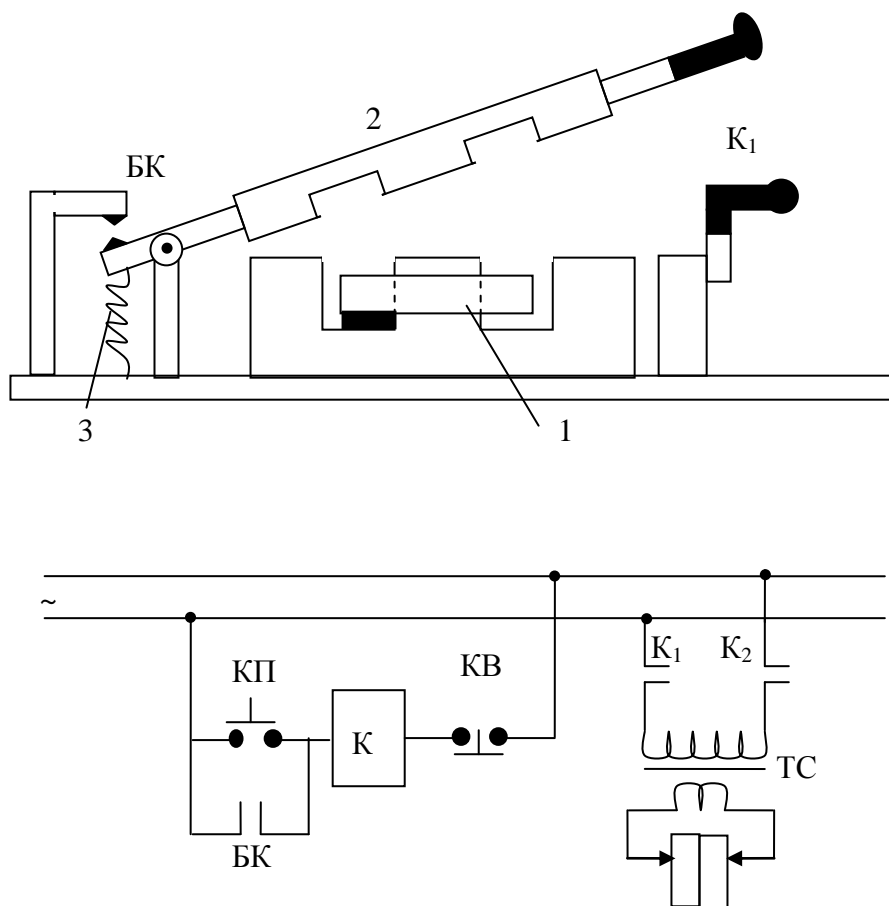
Не смотря на то, что установившиеся состояние в сварочной цепи достигается относительно быстро (в течение 1-3 периодов переменного тока), колебания в величине тока. Связанные с асинхронным включением, могут существенно влиять на сварочный нагрев, в особенности при точечной сварке на «жёстких» режимах и при роликовой сварке.

Не менее существенно при контактной сварке синхронное выключение тока. Если ток выключается не при нулевом значении, то в контакторе возникает электрическая дуга, разрушающая контакты и задерживающая действительное выключение тока на $t_d=0,02-0,05$ сек по отношению к моменту срабатывания контактора. При случайном срабатывании контактора вблизи нулевого значения тока дуга не загорается и запаздывания не будет. Затяжки выключения тока также как и неустойчившиеся процессы при его включении, ведут к нестабильности энергетических параметров сварки.

В машинах для контактной сварки устанавливаются электромагнитные, а также игнитронные или тиристорные контакторы. Электромагнитные контакторы являются асинхронные, а игнитронные и тиристорные в зависимости от схемы зажигания – синхронными или полусинхронными.

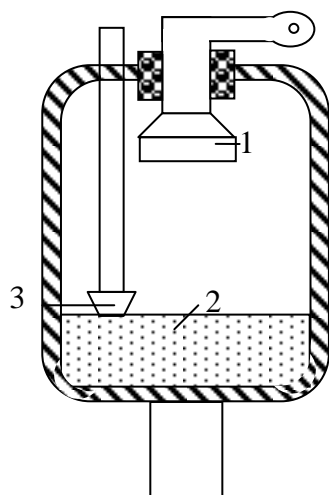
Электромагнитные контакторы.

Когда время включения тока достаточно велико ($t_{св}>0,25-0,35$ сек) нестабильность режима, связанная с асинхронным включением и выключением тока, мало сказывается на стабильности качества соединения. В этих случаях, в частности машинах для стыковой сварки широко применяются простые и дешёвые электромагнитные контакторы.



При нажатии кнопки КП замыкается цепь катушки 1 контактора К, которая притягивает якорь 2, замыкаются силовые контакты K_1 и K_2 , включающие сварочный трансформатор и блокировочные контакты БК. После окончания сварки (например, после оплавления и осадки на заданную величину при стыковой сварке) срабатывает конечный выключатель КВ, размыкающий цепь катушки контактора П. При этом якорь контактора возвращается в исходное положение под действием пружины 3 и размыкаются контакты K_1 и K_2 , отключая трансформатор.

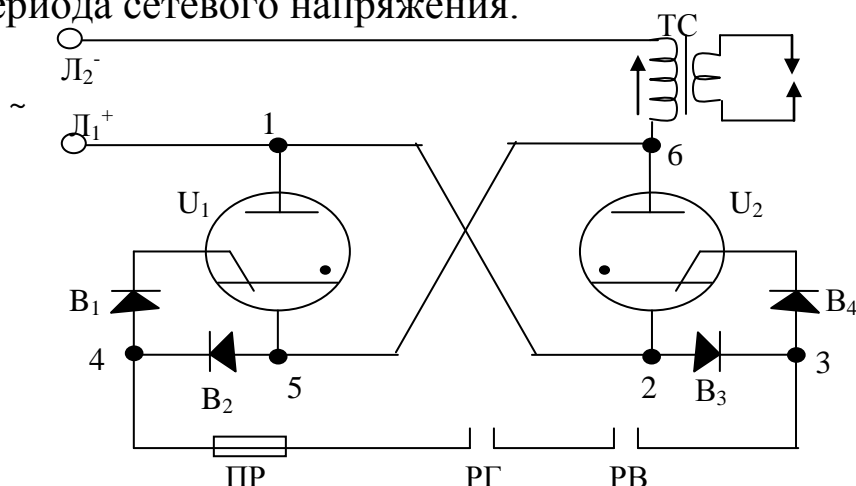
Игнитронные и тиристорные контакторы.



В точечных и роликовых машинах включение и выключение тока обычно осуществляется игнитронными или тиристорными асинхронными (полусинхронными) или синхронными контакторами. Игнитрон представляет собой управляемый газоразрядный ртутный прибор, пропускающий ток одного направления при

горении дуги между стальным или графитовым анодом 1 и ртутным катодом 2. Игнитрон приводит ток при подаче на его поджигатель, которым обычно является полупроводниковый кристалл карбида бора или карборунда частично погружённый в ртуть, положительного, относительно катода, напряжения 15-20В перед каждым периодом горения основной дуги. Основная дуга зажигается менее чем, через 0,001 сек после возбуждения вспомогательной (дежурной дуги) между зажигателем и ртутным катодом (вспомогательная дуга ионизирует пары ртути в баллоне игнитрона и если при этом на анод подано положительная, относительно катода напряжение, то между ними зажигается дуга). При включении игнитрона в цепь переменного тока анодный ток начинает протекать в положительный полупериод при наличии напряжения поджога на поджигателе. При переходе тока через нуль игнитрон гаснет. В течение отрицательного полупериода пары ртути успевают полностью деионизироваться и для зажигания игнитрона в следующий положительный полупериод необходим новый импульс поджога.

В машинах малой и средней мощности игнитроны заменяются тиристорами – четырёхслойными полупроводниковыми управляемыми приборами типа ВКДУ-150, ВКДУ-320, Т-320, Т-600. Тиристор, как игнитрон пропускает ток только одного направления и только при подаче на управляющий электрод импульса запуска. Тиристор может включаться при подаче на управляющий электрод низкого напряжения (1-6В) и протекании небольшого тока 80-300 ма, (у игнитрона 10-30а). Кроме того, тиристор значительно меньше игнитрона по объёму и весу. Асинхронный игнитронный контактор типа КИА содержит два встречно параллельно включённых игнитрона, обеспечивающих протекание тока через трансформатор в оба полупериода сетевого напряжения.



Поджигатель игнитронов включены через вентили В1-В4 плавкий предохранитель ПР, контакт реле времени РВ, определяющий время работы контактора и контакт гидрореле РГ. Контакт РГ замыкается только при достаточном расходе воды, охлаждающей игнитроны.

Предположим, что в первый полупериод полярность сетевого напряжения, такая как указано на схеме.

В этом случае проводящим может быть только игнитрон U_1 , у которого на аноде +. Если контакт РВ замкнут, то в цепи поджигателя игнитрона U_1 протекает ток по пути:

$$Л_1-1-2-B_3-3-PB-PГ-ГР-4-B_1-ПУ_1-5-6-TC-Л_2.$$

Игнитрон U_1 зажигается и пропускает через первичную обмотку полувольту тока в направлении указанной стрелкой по пути:

$$Л_1-1-U_1-5-6-Te-Л_2$$

В следующий полупериод полярность сетевого напряжения меняется на противоположную. Игнитрон U_1 гаснет, а проводящим может быть игнитрон U_2 , у которого теперь + на аноде. Если контакт РВ остаётся замкнутым, то в цепи поджигателя игнитрона U_2 протекает ток по пути:

$$Л_2-Te-6-5-B_2-4-ПР-РГ-PB-3-B_4-ПУ_2-2-1-Л_1$$

При этом зажигается игнитрон U_2 и пропускает через первичную обмотку трансформатора полувольту тока в направлении обратно указанному стрелкой по пути.

$$Л_2-Te-6-U_2-2-1-Л_1$$

Таким образом, встречно параллельное включение игнитронов обеспечивает протекание через первичную обмотку трансформатора переменного тока. При размыкании контакта РВ горящий игнитрон отключается не сразу, а только при переходе тока через нуль. Аналогичную схему имеет асинхронный тиристорный контактор.

В синхронном тиристорном контакторе КТС, запуск тириستоров осуществляется специальной полупроводниковой схемой управления, обеспечивающей включение тиристоров в заданной (устанавливаемой с помощью регулятора) точке синусоиды.

В точечных и роликовых машинах широко применяются синхронные игнитронные прерыватели типа ПИТ и ПИШ. Эти прерыватели обеспечивают синхронное включение тока в заданной точке синусоиды, устанавливаемой потенциометром нагрет, а также схему стабилизации тока и схему корректирования, обеспечивающую равенство полуволн тока через трансформатор в оба полупериода.

Прерыватель ПИТ обеспечивает пропускание одного импульса тока длительностью от 1 до 19 периодов (длительность импульсов устанавливается переключателем «импульс»).

Прерыватель ПШ обеспечивает пропускание через трансформатор импульсов тока, чередующихся с паузами. Длительность импульсов и пауз устанавливается в пределах от 1 до 19 периодов переключателями «импульс» и «пауза».

В точечных машинах последовательность и продолжительность элементов цикла сварки точки «сжатие», «сварка», «проковка» и «пауза» задаётся с помощью электронного реле времени типа РВЭ-7, РВЭ-8. Более точный отсчёт длительности каждой операции возможен в цифровых устройствах типа регулятора РВД-200, работающего на полупроводниках с декатронными счётчиками или регулятор РЦС-403, РСЦС-5, построенных на транзисторных бесконтактных элементах «логика». В этих регуляторах отсчёт времени строится по числу периодов переменного тока.

Машины для стыковой сварки.

Типовые машины.

Машина МСУ-150 предназначена для сварки деталей из низкоуглеродистой стали сечением до 1000 мм^2 непрерывным оплавлением и до 2000 мм^2 оплавлением с подогревом. Привод оплавления и осадки электромеханический, зажимы пневматические. Скорость оплавления регулируется стальным кулачком сменными шестернями и текстурной передачей $N_{\text{ном}}=150 \text{ кВА}$.

Машина МС-1604 предназначена для сварке оплавлением и оплавлением с подогревом детали из чёрных и цветных металлов сечением до 300 и 1500 мм^2 соответственно. Зажимы машины пневматические. Привод оплавления и осадки пневматический. Длительность импульса подогрева, осадки под током и без тока задаются электронным регулятором. Подогрев осуществляется автоматически посредством электронного реле напряжения. Контактёр – игнитронный. Усилия осадки достигают 5 т , скорость оплавления от $0,15$ - 20 мм/сек , скорость осадки 250 мм/сек .

Машины МС-1202 и МС-1602, рассчитанные на сварку деталей из малоуглеродистой стали сечением 300 и 600 мм^2 имеют ручной рычажный привод, соответственно $I_{\text{ном}}=1200 \text{ А}$ и 16000 А ; $N_{\text{ном}}=55 \text{ кВА}$ и $96,5 \text{ кВА}$.

Машина МСЛ-300 предназначена для сварки непрерывным оплавлением полос из стали и цветных металлов толщиной $1,5$ - 6 мм и шириной до 300 мм . Привод оплавления электромеханический, период оборота кулачка, перемещающего передвижную плиту при оплавлении, регулируется изменением скорости вращения двигателя постоянного тока.

Привод осадки и зажимов пневмогидравлический. Контактор – электромагнитный. Машина комплектуется гратоснимателем плужкового типа $N_{ном}=300\text{кв}$.

Машина МС-2501 предназначена для сварки полос из низкоуглеродистых сталей толщиной 0,8-3,5мм и шириной 30-250мм. Зажимы пневматические. Привод оплавления электромеханический, осадки – пневматический. Машина снабжена гратоснимателем.

Машина МСГУ-500 предназначена для сварки оплавлением и оплавлением с подогревом деталей из низкоуглеродистой и низколегированной стали сечением до 8000мм^2 . Зажимы машины пневмогидравлические. Привод оплавления и осадки гидравлический.

Машины МС-201 и МС-202 предназначены для сварки проволоки из углеродистой стали диаметром 0,5-3мм и 1,6-6мм с термообработкой в машине. Машина имеет пружинный привод, обеспечивающий для диапазона регулирование осадки для каждой машины от 0,1 до 1,6 и от 0,2 до 3,2 кг, а также от 1,0 до 5,6 и от 1 до 10кг, МС-201 $I_{ном}=1600\text{а}$.

Машины для точечной сварки.

Типовые машины.

Машина МТ-601 предназначена для точечной сварки деталей из низкоуглеродистой стали. Машина имеет радиальный ход верхнего электрода и пневматический привод сжатия ($P_{\max}=200\text{кг}$). Регулятор времени на электронной лампе обеспечивает плавное регулирование длительности сварки и пауз. Контактор электромагнитный.

$$U_{20}=1,5-2,5\text{В } I_{\text{ном}}=6300\text{А } N_{\text{ном}}=14,2\text{кВА.}$$

Машина МТ-602 такого же исполнения, но взамен электромагнитного контактора имеет асинхронный прерыватель на тиристорах.

Машина МТ-605 предназначена для точечной сварки деталей из углеродистой стали толщиной до $5+5\text{мм}$, нержавеющей стали до $1,2+1,2\text{мм}$ и алюминиевых сплавов до $0,8+0,8\text{мм}$. Машина имеет прямолинейный ход верхнего электрода от пневмопривода ($P_{\max}=650\text{кг}$) $U_{20}=3-6\text{В}$. Контактор игнитронный.

Машина снабжена бесконтактным регулятором цикла сварки типа РСЦС-5. В пневмосистеме предусмотрены большие проходные отверстия, установлен скоростной клапан КПЭД-5, облегчённый ползун и цилиндр с диафрагменным приводом. Это позволяет получать на машине до 500 точек в минуту.

$$I_{\text{ном}}=76000\text{А } N_{\text{ном}}=85\text{кВА.}$$

Машина МТ-1609 отличается от МТ-1605 радиальным ходом верхнего электрода и меньшим темпом работы (до 150 точек в минуту). Она предназначена для сварки низкоуглеродистой стали толщиной $0,5-2,5\text{мм}$ на жёстком режиме и до $5+5\text{мм}$ на мягком.

$$I_{\text{ном}}=16000\text{а, } N_{\text{ном}}=85\text{кВА.}$$

Машина МТ-4001 предназначена для сварки деталей из низкоуглеродистой стали толщиной от 3,5+3,5мм до 12+12мм. Машина имеет игнитронный контактор и электронное реле времени типа РВЭ-7 или РВЭ-8. Привод сжатия – пневматический.

Машина МТПТ-600 предназначена для точечной сварки деталей из алюминиевых сплавов толщиной от 1,5+1,5 до 4,0+4,0мм импульсом выпрямленного тока. Привод сжатия пневматический диафрагменный. Машина имеет электродвигатель дополнительного хода, позволяющий устанавливать до сварки верхний электрод в требуемое положение. Выпрямитель собран по трёхфазной мостовой схеме на игнитронах.

$I_{ном}=100000a$, $N_{ном}=600kva$.

Машина ТКМ-7 предназначена для точечной конденсаторной сварки деталей толщиной до 0,5-0,7мм и таким же или более толстым металлом.

Машина МТВ-6303 $N_{ном}=500kva$ толщиной сваривающих деталей: коррозионно-стойких сталей 3-12мм, алюминиевых сплавов 1-3,5мм

$R_{св}=1000-6000кгс$, $R_{пр_{max}}=10000кгс$.

Машина МТК-75 предназначена для точечной конденсаторной сварки деталей из алюминиевых сплавов толщиной от 0,3+0,3мм до 2,5+2,5мм. Максимальная запасаемая в конденсаторах энергия 22квт.сек. Выпрямитель заряда конденсатора трёхфазный игнитронный. Привод такой же, как в машине МТПТ-600. Максимальный импульс тока достигает 80ка. Так же изготавливаются машины МТК-1201 (энергия 0,24 квт.сек), МТК-5-3 (энергия 2,7квт.сек), МТК-6301 (энергия 9,8+166,6квт.сек).

Машины для шовной сварки.

Типовые машины.

Машина МШ-1001 предназначена для продольной и поперечной шовной сварки деталей из низкоуглеродистой стали толщиной до 1,2+1,2мм. Машина имеет пневматический привод с радиальным ходом ролика. Универсальная поворотная головка со встроенным бесступенчатым приводом вращения ПСМ-0,17 обеспечивает продольную и поперечную сварку. Трансформатор включается электромагнитным контактором.

$I_{ном}=10000a$, $N_{ном}=27квa$.

Машина МШ-2001 предназначена для продольной и поперечной шовной сварки деталей из низкоуглеродистой и легированной стали толщиной от 0,5+0,5мм до 1,8+1,8мм. Машина снабжена синхронным игнитронным прерывателем. Привод сжатия пневматический. Верхняя головка имеет карданный бесступенчатый привод ПМС с центробежным регулятором скорости.

$I_{ном}=20000A$, $N_{ном}=130квa$.

Машина МШП-200-5 предназначена для поперечной, а машина МШП-200-6 для продольной сварки низкоуглеродистой и легированной стали толщиной до 2,5+2,5мм. Ролики приводятся от асинхронного электродвигателя через карданный вал и систему зубчатых и червячных передач. Машина снабжается асинхронным игнитроном прерывателем типа ПИШ-100-4

$N_{ном}=200квa$

Машина МШВ-6301 $N_{ном}=450квa$, $I_{ном}=63кA$. Толщина свариваемых деталей из коррозионно-стойких сталей 0,3-2,5мм, алюминиевых сплавов-0,5-2,5мм

$R_{св}=200-1100кгс$, $R_{пр}=2200кгс$, $V_{св}=0,2-8м/мин$.

Список литературы:

1. В. Д. Орлов (Технология и оборудование контактной сварки) Машиностроение, 1975г.
2. Н. С. Кабанов “Сварка на контактных машинах”, 1973г.
3. А. С. Гельман “Технология и оборудование контактной сварки”, 1960г.
4. Л. В. Глебов, Ю К. Филиппов и др. “Установка и эксплуатация машин для контактной сварки”, 1973г.
5. П. Л. Чулошников “Точечная и роликовая сварка легированных сталей и сплавов”, Машиностроение, 1974г.
6. О. Орлов, П. Л. Чулошников “Контроль точечной и роликовой сварки”, 1973г.
7. В. Е. Недорезов “Электросварочные машины”, 1977г.