

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Ю.А. ВАШУКОВ

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ СВАРКИ

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в качестве учебного пособия для обучающихся по основной образовательной программе высшего образования по направлениям подготовки 24.05.07 Самолето- и вертолетостроение, 24.05.01 Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов, 27.03.02 Управление качеством, 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств, 24.04.04 Авиастроение

© Самарский университет, 2019

ISBN 978-5-7883-1445-7

САМАРА
Издательство Самарского университета
2019

УДК 621.791(075)
ББК 30.61я7
В 234

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. А. Н. К о п т е в;
первый заместитель генерального директора –
Главный инженер АО «РКЦ «Прогресс» А. В. К о ч е т к о в

Вашуков, Юрий Александрович

В 234 **Термомеханические способы сварки:** учеб. пособие / *Ю.А. Вашуков* – Электрон. текст. дан. (1,4 Мб). – Самара: Издательство Самарского университета, 2019. – 1 опт. компакт-диск (CD-ROM). – Систем. требования: PC, процессор Pentium, 160 МГц ; оперативная память 32 Мб ; на винчестере 16 Мб ; Microsoft Windows XP/Vista/7; разрешение экрана 1024x768 с глубиной цвета 16 бит; DVD-ROM 2-х и выше, мышь; Adobe Acrobat Reader. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-5-7883-1445-7

Составлено в соответствии с рабочими программами курсов, связанных со сборочно-сварочными процессами в производстве летательных аппаратов, для обучающихся институтов авиационной и ракетно-космической техники Самарского университета.

Данная работа содержит краткие теоретические сведения и указания для выполнения лабораторных работ и контрольные вопросы.

Рассматриваются процессы термомеханических методов сварки, их особенности, влияние технологических параметров процесса сварки на прочностные характеристики изделий, их преимущества и недостатки.

Предназначено для обучающихся по основным образовательным программам высшего образования по специальностям 24.05.07 Самолето-и вертолетостроение при изучении дисциплины «Технология сборочно-сварочных процессов» в 9 семестре; 24.05.01 Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов при изучении дисциплины «Технология сборочно-сварочных процессов» в 9 семестре; по направлениям подготовки 27.03.02 Управление качеством при изучении дисциплины «Технология и оборудование машиностроительного производства» в 6 семестре; 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств при изучении дисциплины «Основы теории сварочных процессов» в 6 семестре, а также для подготовки магистров по направлению 24.04.04 Авиастроение при изучении дисциплины «Технология производства самолетов» в 9 семестре.

Может быть полезно молодым специалистам авиационной и ракетно-космической отраслей.

Подготовлено на кафедре производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении Самарского университета.

УДК 621.791(075)
ББК 30.61я7

Редактор И.П. Ведмидская
Компьютерная вёрстка И.П. Ведмидской

Подписано для тиражирования 30.10.2019.

Объем издания 1,4 Мб.

Количество носителей 1 диск.

Тираж 10 дисков.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

443086, САМАРА, МОСКОВСКОЕ ШОССЕ, 34.

Изд-во Самарского университета.
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА КОНТАКТНОЙ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ СТАЛЕЙ НА ПРОЧНОСТЬ СОЕДИНЕНИЯ	8
1.1. Особенности контактной точечной сварки.....	8
1.2. Последовательность процессов при контактной точечной сварке.....	10
1.3. Особенности подготовки деталей под точечную сварку.....	11
1.4. Параметры режима точечной контактной сварки и их влияние на качество соединения	12
1.5. Свариваемость конструкционных материалов при точечной сварке ..	18
1.6. Оборудование для контактной точечной сварки.....	22
1.7. Дефекты контактной точечной сварки	25
1.8. Способы исправления дефектов.....	27
1.9. Контроль качества соединений точечной сваркой.....	28
1.10. Преимущества и недостатки контактной точечной сварки	31
1.11. Техника безопасности при выполнении лабораторной работы.....	32
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ДИФФУЗИОННОЙ СВАРКИ В ВАКУУМЕ НА ПРОЧНОСТЬ СОЕДИНЕНИЯ	35
2.1. Общие сведения о диффузионной сварке в вакууме	35
2.2. Влияние технологических параметров процесса сварки на качество соединения	36
2.3. Оборудование для диффузионно-вакуумной сварки.....	43
2.4. Преимущества и недостатки диффузионной сварки. Применение диффузионной сварки	47
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	49

ВВЕДЕНИЕ

Термомеханический класс объединяет виды сварки, осуществляемые давлением (механической энергией) с использованием тепловой энергии общего или местного характера. При этом способе сварки отсутствуют характерные для сварки плавлением недостатки, обусловленные достаточно длительным термическим воздействием на свариваемые материалы: литая структура металла шва, значительные размеры зоны термического влияния, остаточные напряжения и деформации и др.

Трудности получения сварного соединения преодолеваются с помощью двух основных приемов:

- за счет нагрева соединяемых частей;
- за счет сдавливания соединения или осадки.

Сдавливание соединяемых частей или их осадка, создает пластические деформации, вызывает течение материала вдоль поверхности раздела, разрушает поверхностные слои окислов и загрязнений, удаляет из зоны сварки в грат поверхностные слои материала, выводит на поверхность внутренние, свежие, «ювенильные» (не бывшие в соприкосновении с атмосферой) слои материала, способствует более тесному соприкосновению атомов соединяемых частей.

Нагрев ослабляет связи между атомами, делает их более подвижными, снижает твердость материала и повышает его пластичность – способность к пластическим деформациям.

Процесс образования соединения без расплавления (или с частичным расплавлением) материала протекает в три стадии:

1. Образование физического контакта, то есть сближение атомов соединяемых металлов в результате пластической деформации на расстояние, при котором становится возможным межатомное взаимодействие.

2. Активация контактных поверхностей (то есть разрыв насыщенных связей). Процесс связан обычно с удалением или разрушением оксидов на контактных поверхностях и начинается при смятии отдельных микровыступов поверхностей при их совместной пластической деформации.

3. Объемное взаимодействие, то есть взаимодействие металлов как по поверхности контакта, так и в смежных объемах.

Все процессы сварки термомеханического класса отличаются друг от друга временной программой деформирования соединения (осадки). Можно выделить следующие процессы осадки:

- длительно действующие при постоянном давлении (диффузионная сварка);
- специально запрограммированные по силе сдавливания и времени её действия (контактная точечная и диффузионная).

Каждый вид сварки термомеханического класса выполняется по схеме сварки давлением без оплавления или с оплавлением металла кромок деталей.

К термомеханическому классу относятся и разновидности контактной сварки: стыковая контактная, точечная, рельефная, шовная. Их объединяет

то, что для формирования соединений используются различные программируемые сочетания электрической и механической энергии. Причем электрическая энергия вводится в контакт между деталями путем пропускания через него сварочного тока, а механическая – путем сдавливания и пластического деформирования материала в зоне сварки.

Стыковую контактную сварку применяют для соединения заготовок сечением до 0,1 м. Соединение свариваемых частей происходит по поверхности стыкуемых торцов. Типичными изделиями являются элементы трубчатых конструкций, колеса, рельсы, железобетонная арматура, листы, трубы. Плавление током металла ведется в постоянном или периодическом режиме, одновременно со сближением заготовок, которые в процессе оплавления укорачиваются на заданный припуск.

При рельефной контактной сварке на заготовках предварительно создают рельефы – локальные возвышения на поверхности размером несколько миллиметров в диаметре. При контактной сварке таких деталей рельефы расплавляются проходящим через них сварочным током, выдавливаются оксиды и загрязнения.

Шовная сварка обеспечивает соединение элементов внахлестку вращающимися дисковыми электродами в виде непрерывного или прерывистого шва. В зависимости от характера вращения роликов различают непрерывную и шаговую (прерывистую) шовную сварку.

Контактная точечная сварка – один из высокопроизводительных способов контактной сварки, при котором соединение получается между торцами электродов, подводящих ток и передающих силу сжатия. Контактная точечная сварка выполняется на специальных машинах.

К термомеханическому классу также относятся диффузионная сварка. Диффузионная сварка осуществляется за счет взаимного проникновения атомов свариваемых изделий (диффузии) при повышенной температуре в вакуумной установке.

Каждый процесс сварки давлением может обеспечить высокое качество соединения в том случае, когда все оксидные и адсорбционные наслоения в плоскости контакта в процессе плавления растворяются в расплаве или полностью выдавливаются из плоскости свариваемого контакта при операции осадки. Эти условия полностью соблюдаются при контактной точечной сварке.

Настоящее учебное пособие является учебно-практическим изданием, содержащим описание лабораторных работ по дисциплинам «Технология сборочно-сварочных процессов», «Технология производства самолетов», «Технология и оборудование машиностроительного производства» в соответствии с утвержденной рабочей программой. Преподавание этих дисциплин ведется для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 24.05.07 Самолето-и вертолетостроение, 24.05.01 Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов, 27.03.02 Управление качеством, 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств, 24.04.04 Авиастроение.

В учебном пособии содержатся систематизированные знания научно-практического и прикладного характера, предназначенные для закрепления материала лекций.

В соответствии с рабочей программой дисциплины пособие содержит описание двух лабораторных работ, посвященных термомеханическим методам сварки.

Описание каждой лабораторной работы содержит теоретическую часть, порядок выполнения работы, требования к отчету о работе и контрольные вопросы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА КОНТАКТНОЙ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ СТАЛЕЙ НА ПРОЧНОСТЬ СОЕДИНЕНИЯ

Цель работы: практическое ознакомление с оборудованием и методикой выбора режима контактной точечной сварки, исследование влияния параметров режима на прочность сварных соединений.

Задание для выполнения лабораторной работы:

1. Ознакомиться с конструкцией основных узлов сварочных машин.
2. Произвести расчет параметров точечной сварки для выданной заготовки.
3. Произвести сварку образцов на автомате для точечной сварки.
4. Определить влияние силы тока на прочность сварного точечного соединения на разрыв.

1.1. Особенности контактной точечной сварки

Контактная точечная сварка – один из высокопроизводительных способов контактной сварки, при котором соединение получается между торцами электродов, подводящих ток и передающих силу сжатия.

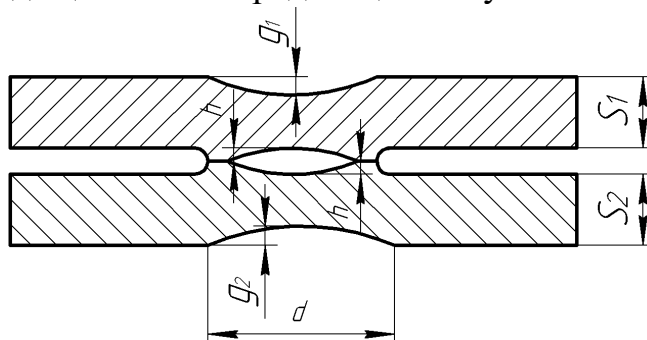


Рис. 1.1. Конструктивные элементы соединений, выполненные контактной точечной сваркой

При контактной точечной сварке соединение образуется посредством нагревания металла с помощью пропускаемого через него тока и пластической деформации сварной зоны под воздействием сжимающих усилий.

Важными условиями получения качественных соединений являются образование литого ядра определенной формы и размеров, а также предотвращение выплесков расплавленного металла из него.

ГОСТ 15878-79 устанавливает следующие конструктивные элементы соединений, выполненных контактной точечной сваркой (рис.1.1): S и S_1 – толщины деталей, d – расчетный диаметр литого ядра точки; h – величина проплавления; g_1 и g_2 – глубина вмятины, B – величина нахлестки, t – расстояние между центрами соседних точек в ряду, c – расстояние между осями соседних рядов сварных точек.

В зависимости от требований к сварным конструкциям и особенностей технологического процесса сварки стандарт устанавливает две группы соединений (А и Б), отличающиеся числовыми значениями конструктивных элементов (табл. 1.1).

Таблица 1.1. Числовые значения конструктивных элементов групп соединений А и Б

S = S1	d, не менее		B, не менее		t, не менее		C, не менее	
	А	Б	А	Б	А	Б	А	Б
Св. 0.4 до 0.6	3.0	2.0	8	6	10	8	12.0	10.0
Св. 0.7 до 0.8	3.5	2.5	10	8	13	10	15.5	12.0
Св. 0.8 до 1.0	4.0	3.0	11	9	15	12	18.0	15.0
Св. 1.3 до 1.6	6.0	4.0	14	11	20	16	24.0	18.0
Св. 1.8 до 2.2	7.0	5.0	17	1B	25	20	30.0	24.0

Расстояние от центра точки до края нахлестки должно быть не менее половины минимальной величины нахлестки. Величина проплавления h , должна быть от 20 до 80 % толщины деталей. Глубина вмятины g_1, g_2 не должна быть более 20 % толщины деталей.

Высокой и стабильной прочностью обладают лишь точки с литым ядром заданных размеров. Сварные соединения группы А отличаются большими диаметрами литого ядра, а следовательно, и большей прочностью, чем соединения группы Б, однако для их выполнения необходима большая величина нахлестки.

Контактная точечная сварка выполняется на специальных машинах (рис. 1.2). Машина состоит из сварочного трансформатора 1, переключателя ступеней трансформатора 2, прерывателя сварочного тока 3, регулятора времени 4, механизма сжатия деталей 5, электрододержателей 6 и электродов 7, датчика сварочного тока 8, прибора для измерения сварочного тока 9.

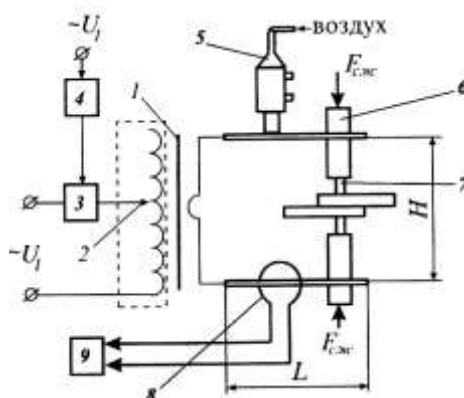


Рис.1.2. Функциональная схема сварочной машины МТП-75-9:

- 1 – сварочный трансформатор; 2 – переключатель ступеней;
- 3 – прерыватель сварочного тока; 4 – регулятор времени цикла сварки РВЭ-7;
- 5 – пневматический механизм сжатия деталей; 6 – электрододержатель;
- 7 – электрод; 8 – тороид-датчик прибора ДТС; 9 – прибор ДТС;
- I. – вылет машины; H – раствор машины

Расстояние от центра точки до края нахлестки должно быть не менее половины минимальной величины нахлестки. Величина проплавления h , h_1 должна быть от 20 до 80% толщины деталей. Глубина вмятины g , g_1 не должна быть более 20% толщины деталей. Диаметр рабочей поверхности электрода $d_э$ обычно близок к расчетному диаметру литого ядра точки d . В основе контактной сварочной технологии лежит разогрев металла под воздействием электричества по закону Джоуля-Ленца.

При сварке ток идет между электродами, проходя при этом через металл свариваемых деталей. При этом электроды изготавливают из материалов с хорошей электропроводностью, чтобы сопротивление контакта детали и электрода было наименьшим.

За счет наибольшего сопротивления контакта деталей между собой наибольший нагрев происходит именно там. При этом нагрев и плавление металла приводит к появлению литых ядер сварных точек. Как правило, их диаметр составляет 4-12 миллиметров.

Особенностями контактной точечной сварки являются: малое время сварки (от 0,1 до нескольких секунд), большой сварочный ток (более 1000 А), малое напряжение в сварочной цепи (1-10В, обычно 2-3 В), значительное усилие сжимающее место сварки (от нескольких десятков до сотен кг), небольшая зона расплавления.

В зависимости от числа свариваемых точек, схемы подвода тока к электродам и свариваемым деталям применяют следующие основные способы точечной сварки:

- *одноточечная* двусторонняя (два электрода, питаемые от одного источника тока, расположены соосно с двух сторон свариваемых деталей);
- *двухточечная односторонняя* (два электрода, питаемые от одного источника тока, расположены с одной стороны свариваемых деталей);
- *двухточечная двусторонняя* (с каждой стороны свариваемых деталей соосно расположены по два электрода, питаемые от отдельных источников тока);
- *многоточечная односторонняя* (несколько пар электродов, питаемых от отдельных источников тока, расположены с одной стороны свариваемых деталей).

Наиболее универсальным является способ одноточечной двусторонней точечной сварки, обеспечивающей возможность сваривать элементы строительных конструкций при толщине металла до 30+30 мм.

1.2. Последовательность процессов при контактной точечной сварке

Весь процесс точечной сварки можно условно разделить на 3 этапа (рис. 1.3):

1. Сжатие деталей, вызывающее пластическую деформацию микронеровностей в цепочке электрод-деталь-деталь-электрод. Между соединяемыми поверхностями формируется предварительный (механический) контакт.

2. Включение импульса электрического тока, приводящего к нагреву металла, его расплавлению в зоне соединения и образованию жидкого ядра. По мере прохождения тока ядро увеличивается по высоте и диаметру до максимальных размеров. Происходит образование связей в жидкой фазе металла. При этом продолжается пластическая осадка контактной зоны до окончательного размера. Сжатие деталей обеспечивает образование уплотняющего пояса вокруг расплавленного ядра, который препятствует выплеску металла из зоны сварки.

3. Выключение тока, охлаждение и кристаллизация металла, заканчивающаяся образованием литого ядра. При охлаждении объем металла уменьшается, и возникают остаточные напряжения. Последние являются нежелательным явлением, с которым борются различными способами. Усилие, сжимающее электроды, снимается с некоторой задержкой после отключения тока. Это обеспечивает необходимые условия для лучшей кристаллизации металла. В некоторых случаях в заключительной стадии контактной точечной сварки рекомендуется даже увеличивать усилие прижима. Оно обеспечивает проковывание металла, устраняющее неоднородности шва и снимающее напряжения. При следующем цикле все повторяется снова.

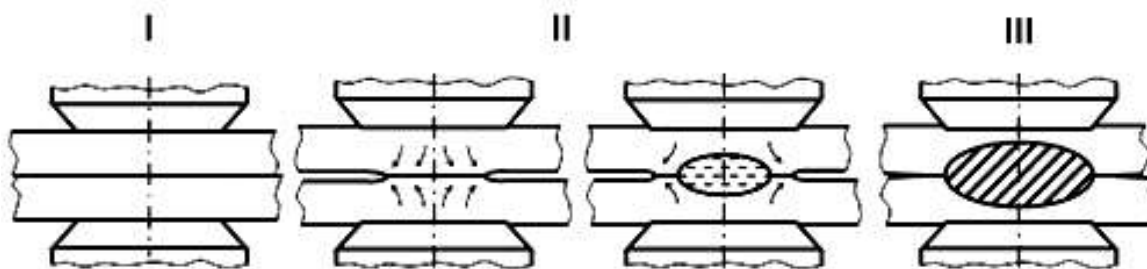


Рис. 1.3. Этапы контактной точечной сварки

1.3. Особенности подготовки деталей под точечную сварку

Подготовку поверхностей деталей проводят для предупреждения и устранения вредных влияний оксидов и загрязнений в междуэлектродной зоне на процесс сварки и качество получаемого сварного соединения. Наличие загрязнений и поверхностных оксидных пленок в зоне сварки может вызвать:

- загрязнение сварного соединения неметаллическими включениями;
- образование раковин, пор и трещин в металле ядра и на поверхности деталей;
- недопустимые выплески металла из зоны сварки;
- подгар и подплавление поверхности деталей;
- повышение уровня нагрева электродов и, соответственно, снижение стойкости их рабочей части.

Прямым следствием указанных дефектов является понижение прочности и коррозионной стойкости соединения. Выбор способа подготовки поверхности деталей зависит от марки свариваемого материала, исходного состояния поверхности заготовки, толщины металла и размера детали, а также от типа производства и требований к качеству соединений. Двусторонняя подготовка поверхности деталей (общая или местная) включает в себя последовательно выполняемые операции: обезжиривание, механическую обработку или химическое травление, пассивирование, нейтрализацию, промывку, сушку, контроль.

В технологии контактной точечной сварки, для зачистки поверхности используют пескоструйную обработку, наждачные круги и металлические щетки, а также травление в специальных растворах.

В большинстве случаев объективной характеристикой качества подготовки поверхности деталей под сварку является величина электросопротивления холодных деталей $r_{\text{х}}$. Сопротивление измеряется микроомметром или же методом амперметра-вольтметра, с использованием специального пресса или непосредственно в электродах сварочной машины с изоляцией одного из электродов.

Материал электродов, форма, размеры рабочей поверхности, сила сжатия должны соответствовать условиям сварки деталей данного типа. Измерение $r_{\text{х}}$ и сравнение с допускаемыми значениями для разных пар материалов нужно выполнять на стадии отработки технологии подготовки поверхности деталей.

1.4. Параметры режима точечной контактной сварки и их влияние на качество соединения

Под режимом сварки следует понимать совокупность параметров процесса, устанавливаемых соответствующими органами управления сварочной машины, а также форму и размеры используемых электродов (роликов, губок), обеспечивающих получение сварных соединений требуемых размеров и качества. Режим сварки определяется в основном свойствами свариваемого металла, типом сварочного оборудования, а иногда и конструкцией (формой) свариваемых деталей.

Основными параметрами режима точечной сварки являются:

- сварочный ток $I_{\text{св}}$ (или плотность тока);
- длительность действия импульсов тока t ;
- усилие сжатия или давления электродов P ;
- диаметр плоской контактной поверхности электрода $d_{\text{э}}$;
- радиус закругления R сферической поверхности электрода диаметром $D_{\text{э}}$.

Для лучшей наглядности процесса эти параметры представляются в виде циклограммы (рис.1.4), отражающей их изменение во времени.

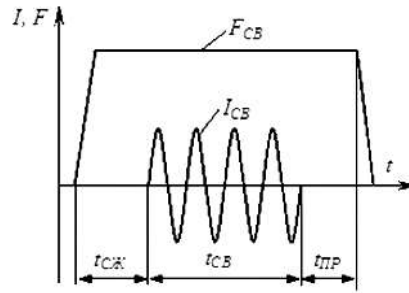


Рис. 1.4. Изменение параметров во времени при точечной сварке

Различают жесткий и мягкий режимы сварки.

Жесткий режим характеризуется большим током, малой продолжительностью токового импульса (0,08-0,5 секунд в зависимости от толщины металла) и большой силой сжатия электродов. Его применяют для сварки медных и алюминиевых сплавов, обладающих большой теплопроводностью, а также высоколегированных сталей для сохранения их коррозионной стойкости.

При *мягком режиме* производится более плавный нагрев заготовок относительно небольшим током. Продолжительность сварочного импульса составляет от десятых долей до нескольких секунд. Мягкие режимы используются для сталей, склонных к закалке. В основном именно мягкие режимы используются для контактной точечной сварки, поскольку мощность аппаратов в этом случае может быть ниже, чем при жесткой сварке.

Размеры и форма электродов. Размер и структура сварной точки, определяющие прочность сварного соединения, в значительной степени зависят от формы контактной (рабочей) поверхности электродов. С помощью электродов осуществляется непосредственный контакт сварочного аппарата с деталями, подвергаемыми сварке. Они не только подводят ток в зону сварки, но и передают сжимающее усилие и отводят тепло. Форма, размеры и материал электродов являются важнейшими параметрами аппаратов для точечной сварки. При сварке низкоуглеродистой стали преимущественно используют электроды с плоской рабочей поверхностью. Высокоуглеродистые и легированные стали, а также медь, алюминий и их сплавы сваривают электродами со сферической поверхностью.

В зависимости от их формы электроды подразделяются на прямые и фигурные. Наиболее распространены первые, они применяются для сварки деталей, допускающих свободный доступ электродов в свариваемую зону. Их размеры стандартизованы ГОСТом 14111-90, который устанавливает такие диаметры электродных стержней: 10, 13, 16, 20, 25, 32 и 40 мм.

По форме рабочей поверхности существуют электроды с плоскими и сферическими наконечниками, характеризующимися соответственно значениями диаметра d_3 и радиуса R (рис.1.5). От величины d_3 и R зависит площадь контакта электрода с деталью, влияющая на плотность тока, давление и величину ядра. Электроды со сферической поверхностью имеют большую стойкость (способны сделать больше точек до переточки) и менее чувстви-

тельно к перекосам при установке, чем электроды с плоской поверхностью. Поэтому со сферической поверхностью рекомендуется изготавливать электроды, используемые в клещах, а также фигурные электроды, работающие с большими прогибами. При сварке легких сплавов (например, алюминия, магния) применяют только электроды со сферической поверхностью. Использование для этой цели электродов с плоской поверхностью приводит к чрезмерным вмятинам и подрезам на поверхности точек и повышенным зазорам между деталями после сварки. Размеры рабочей поверхности электродов выбирают в зависимости от толщины свариваемых металлов. Следует отметить, что электроды со сферической поверхностью могут быть использованы практически во всех случаях точечной сварки, электроды же с плоской поверхностью очень часто неприменимы.

Толщина детали (мм)	Размеры электродов (мм)		
	D*	d _э	R
0,5	12	4	25_50
0,8	12	5	50_75
1,0	12	5	75_100
1,2	16	6	75_100
1,5	16	7	100_150
2,0	20	8	100_150
3,0	25	10	150_200
4,0	25	12	200_250

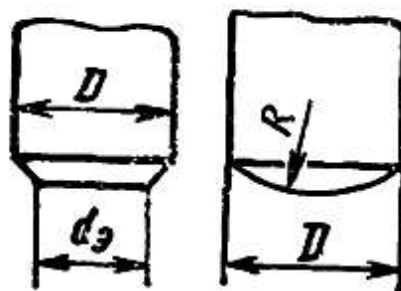


Рис. 1.5. Рекомендуемые размеры электродов

Посадочные части электродов (места соединяемые с электродержателем) должны обеспечивать надежную передачу электрического импульса и усилие прижима. Часто они выполняются в виде конуса, хотя существуют и другие виды соединений – по цилиндрической поверхности или резьбе.

Очень важное значение имеет материал электродов, определяющий их электрическое сопротивление, теплопроводность, термостойкость и механическую прочность при высоких температурах. В процессе работы электроды нагреваются до больших температур. Термоциклический режим работы, совместно с механической переменной нагрузкой, вызывает повышенный износ рабочих частей электродов, результатом чего становится ухудшение качества соединений. Чтобы электроды были в состоянии противостоять тяжелым условиям работы, их делают из специальных медных сплавов, обладающих жаропрочностью и высокой электро- и теплопроводностью. Чистая медь также способна работать в качестве электродов, однако она обладает низкой стойкостью и требует частых переточек рабочей части.

Сила сварочного тока. Сила сварочного тока (I_{CB}) – один из основных параметров точечной сварки. От нее зависит не только количество тепла, выделяющегося в зоне сварки, но и градиент его увеличения по времени, т.е. скорость нагрева. Напрямую зависят от I_{CB} и размеры сварного ядра d , h и h_1 (рис. 1.1) увеличивающиеся пропорционально увеличению I_{CB} .

Необходимо отметить, что ток, который протекает через зону сварки (I_{CB}), и ток, протекающий во вторичном контуре сварочной машины (I_2), различаются между собой – и тем больше, чем меньше расстояние между сварными точками. Причиной этого является ток шунтирования ($I_{Ш}$), протекающий вне зоны сварки – в том числе и через ранее выполненные точки (рис. 1.6). Таким образом, ток в сварочной цепи аппарата должен быть больше сварочного тока на величину тока шунтирования:

$$I_2 = I_{CB} + I_{Ш}$$

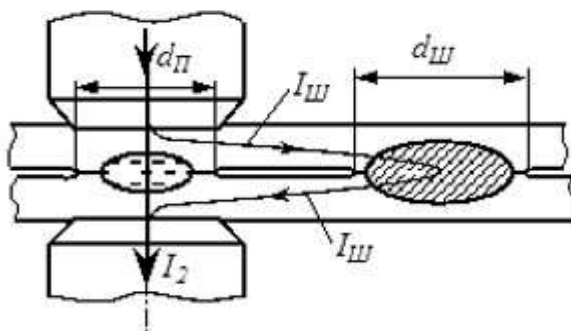


Рис. 1.6. Схема шунтирования тока через ранее сваренную точку

Для определения силы сварочного тока можно пользоваться разными формулами, которые содержат различные эмпирические коэффициенты, полученные опытным путем. В случаях, когда точное определение сварочного тока не требуется (что и бывает чаще всего), его значение принимают по таблицам, составленным для разных режимов сварки и различных материалов. Режимы точечной сварки для низкоуглеродистых сталей приведены в таблице 1.2. Увеличение времени сварки позволяет сваривать токами намного меньшими, чем приведенные в таблице.

Таблица 1.2. Режимы точечной сварки низкоуглеродистых сталей

Толщина деталей, мм	Ток $I_{св.д.}$, кА	Длительность тока $t_{св.}$, с	Усилие электродов $F_{св.}$, кгс
Жесткие режимы			
0,5	5,5–6	0,08–0,1	120–180
0,8	6,5–7	0,1–0,14	200–250
1	7,5–8	0,12–0,16	250–300
1,2	9–10	0,14–0,18	300–400
1,5	10,5–11,5	0,16–0,22	400–500
2	13–15	0,18–0,24	600–700
3	18–20	0,24–0,3	900–1000
3,5	20–22	0,3–0,4	1100–1200
4	23–20	0,4–0,56	1300–1500
Мягкие режимы			
0,6	3,5	0,2	80
0,8	4	0,3	120
1	5	0,4	150
1,2	5,5	0,5	200
1,5	6,5	0,6	220
1,8	7	0,7	300
2	7,5	0,8	350
2,5	9,5	1	400
3	12	1,3	500

Время сварки. При расплавлении ядра точки жидкий металл удерживается от вытекания слоями, нагретыми до температуры пластического состояния. Чрезмерная выдержка под током может привести к перегреву ядра, образованию внутреннего или внешнего выплеска металла и продавливанию электродами наружных слоев детали, что приведет к снижению прочности соединения.

Под временем сварки (t_{CB}) понимают продолжительность импульса тока при выполнении одной сварной точки. Вместе с силой тока оно определяет количество теплоты, которое выделяется в зоне соединения при прохождении через нее электрического тока.

При увеличении t_{CB} повышается проплавление деталей и растут размеры ядра расплавленного металла (d , h и h_1). Одновременно с этим увеличивается и теплоотвод из зоны плавления, разогреваются детали и электроды, происходит рассеивание тепла в атмосферу. При достижении определенного времени может наступить состояние равновесия, при котором вся подводимая энергия отводится из зоны сварки, не увеличивая проплавление деталей и размер ядра. Поэтому увеличение t_{CB} целесообразно только до определенного момента.

При точном расчете продолжительности сварочного импульса должны учитываться многие факторы – толщина деталей и размер сварной точки, температура плавления свариваемого металла, его предел текучести, коэффициент аккумуляции тепла и пр. Есть сложные формулы с эмпирическими зависимостями, по которым при необходимости осуществляют расчет.

На практике чаще всего время сварки принимают по таблицам, корректируя при необходимости принятые значения в ту или иную сторону в зависимости от полученных результатов.

Усилие сжатия. Усилие сжатия (F_{CB}) оказывает влияние на многие процессы контактной точечной сварки: на пластические деформации, происходящие в соединении, на выделение и перераспределение тепла, на охлаждение металла и его кристаллизацию в ядре. С увеличением F_{CB} увеличивается деформация металла в зоне сварки, уменьшается плотность тока, снижается и стабилизируется электрическое сопротивление на участке электрод-деталь-электрод. При условии сохранения размеров ядра неизменными, прочность сварных точек с ростом усилия сжатия возрастает.

При сварке на жестких режимах применяют более высокие значения F_{CB} , чем при мягкой сварке. Это связано с тем, что при увеличении жесткости возрастает мощность источников тока и проплавление деталей, что может приводить к образованию выплесков расплавленного металла. Большое усилие сжатия как раз и призвано воспрепятствовать этому.

Для проковки сварной точки с целью снятия напряжений и повышения плотности ядра, технология контактной точечной сварки в некоторых случаях предусматривает кратковременное увеличение силы сжатия после отключения электрического импульса (рис. 1.7).

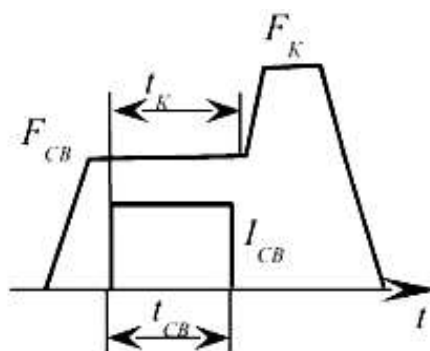


Рис. 1.7. Изменение усилия сжатия при точечной сварке

Сварочный ток и усилие сжатия деталей должны обеспечивать плотность тока и давление в сварочном контакте, необходимые для образования литой зоны заданных размеров. Так, при сварке малоуглеродистых сталей на «жестком» режиме средняя плотность тока в контакте электрод-деталь лежит в пределах 200-400А/мм², а давление – в пределах 50-120 МПа. Минимальная длительность прохождения сварочного тока, обеспечивающая получение сварных точек заданных размеров и прочности без выплесков при сварке, устанавливается опытным путем.

С увеличением I_{CB} и t_{CB} размеры литого ядра точки растут. Увеличение усилия сжатия деталей приводит к уменьшению контактного и собственного электрического сопротивления деталей и снижает плотность тока в них. При постоянной силе тока и продолжительности включения его увеличение усилия сжатия деталей ведет к уменьшению размеров и прочности сварной точки. Если увеличение F_{CB} сопровождается соответствующим увеличением I_{CB} и t_{CB} , так что размеры сварной точки не уменьшаются, то прочность точек с увеличением F_{CB} становится более стабильной.

Режимы сварки и прочностные характеристики образцов, полученных точечной сваркой приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3. Режимы сварки и прочностные характеристики образцов

Марка	S=S, мм	$d_3 = d$ мм	t_{CB} сек	F_{CB} , Н	I_{CB} , кА	F без .Н. не менее
Сталь 10, 20	0,5	3,5-4,0	0,1—0,3	400—1200	3—5	1450
	0,8	4,0-5,0	0,1—0,3	500—1600	5—6	3000
	1,0	5,0—6,0	0,2—0,5	800—2000	6-8	4000
	1,5	6,0—7,0	0,3—0,7	1400—3500	7—9	8000
	2,0	7,0—9,0	0,4—0,9	2500—5000	8—10	11000
ЗОХГСА	0,5	3,5—4,0	0,3—0,7	300-400	2,5—4,0	1700
	0,8	4,0—4,5	0,5-0,8	450—550	3—5	3600
	1,0	5,0—6,0	0,8—1,2	700—800	4—6	4800
	1,5	6,0—7,0	1,0—1,5	1200 1400	5—7	9000
	2,0	7,0—9,0	1,4-2,0	1900—2200	6-8	13000
X18H10T	0,5	3,5—4,0	0,06—0,08	1500—2000	3,5—4,5	2000
	0,8	4,0—4,5	0,10—0,12	2400—3000	5,0—6,2	3800
	1,0	4,5—5,0	0,12—0,16	3000—4000	5,8—6,7	5000
	1,5	5,5—6,5	0,16—0,20	5000—6500	7,2—8,5	7500
-	2,0	7,0-8,0	0,24—0,26	7500—8500	8,5—10,0	10000

1.5. Свариваемость конструкционных материалов при точечной сварке

Качество получаемых сварных соединений (свариваемость металла) оценивают исходя из следующих общих требований:

- отсутствие значительного разупрочнения металла и образования хрупких структур в зоне соединения, особенно в переходной зоне;
- структурная однородность и плотность соединения металла литой и переходной зон без заметных нарушений сплошности;
- обеспечение требуемых и стабильных размеров и прочности соединений;
- отсутствие снижения стойкости металла к коррозии;
- деформация свариваемых деталей в допустимых пределах.

При сварке различных металлов выполнение этих требований зависит от возможностей оборудования. Если указанные требования выполняются при использовании широкого диапазона параметров режима, то считается, что металл обладает хорошей свариваемостью. Если сварное соединение может быть не получено или получено только в очень узком интервале параметров режима и имеет низкую и нестабильную прочность, то считается, что металл имеет плохую свариваемость. Понятие свариваемости служит для качественной оценки металла. Свариваемость не является постоянным свойством данного металла. По мере совершенствования оборудования и технологии свариваемость конкретного металла может быть улучшена. Свариваемость зависит от многих свойств металла (табл. 1.4): электропроводности и теплопроводности, прочности при высоких температурах (сопротивление деформации $\sigma_{0.2}^*$), температур плавления, коэффициента линейного расширения, твердости и чувствительности к термическому циклу сварки (изменения свойств под действием нагрева).

Имеется достаточно тесная связь основных параметров режима $I_{св}$, $t_{св}$, $F_{св}$ со свойствами металлов, определяющими их свариваемость: удельным электросопротивлением ρ , теплопроводностью λ и сопротивлением деформации $\sigma_{0.2}^*$. С уменьшением электропроводности и теплопроводности снижается $I_{св}$, и на образование соединения требуется меньшая электрическая мощность. Высокое сопротивление деформации при повышенных температурах требует больших $F_{св}$ для осуществления необходимой деформации свариваемого металла. При сварке металлов с высокой твердостью приходится также использовать повышенные $F_{св}$ или применять предварительный подогрев металла. С повышением коэффициента линейного расширения увеличиваются деформации свариваемых деталей. *Низкоуглеродистые стали* имеют достаточно высокое электросопротивление (в 7 раз больше, чем у меди) и низкую прочность, в связи с чем их сваривают в широком диапазоне режимов. При точечной сварке используют относительно небольшие плотности тока (до 600 А/мм²) и давление (до 150 МПа), отнесенные к площади сечения литого ядра в плоскости соединения. Низкоуглеродистые стали хорошо сваривают

ваются всеми видами контактной сварки. Эта группа металлов отличается незначительным снижением прочности в результате нагрева, хорошей пластичностью сварных соединений и малой склонностью к образованию трещин.

Таблица 1.4. Основные свойства металлов, влияющие на свариваемость

Марка металла	Температура плавления $T_{пл}$, °С	Удельная теплоемкость c , кДж/кг х К	Теплопроводность λ , Вт/(м*К)	Удельное электросопротивление $\rho * 10^6$, Ом*м	Электропроводность, % (к мягкой меди)	Предел текучести $\sigma_{0.2}$, МПа	Временное сопротивление σ_b , МПа
08кп	1530	0,452	57	0,13	13	180(35)	330
30ХГСА	1480	0,380	39,4	0,21	8	950(50)	1100
12Х18Н10Т	1440	0,502	16,4	0,75	2,3	200(80)	560
ХН60В	1400	0,44	9,65	1,2	1,4	350(220)	900
ОТ4-1	1700	0,503	9,61	1,42	1,2	600(40)	750
АМН	652	0,92	183,9	0,034	51	100(45)	170
Д16Т	633	0,79	117	0,057	30	280(80)	420
Л63	910	0,385	109	0,068	25	110(45)	375
МА2-1	632	1,09	96	0,12	43	200(45)	270
НМЖМ ц28-2,5-1.5	1350	0,55	25,1	0,482	3,6	240(85)	600
Медь	1083	0,385	385	0,0172	100	60	220

В скобках приведены средние значения $\sigma_{0.2}$ при температуре (0,5—0,6) $T_{пл}$.

Низколегированные и углеродистые стали в связи с относительно высокими скоростями нагрева и охлаждения, используемыми при контактной сварке, склонны к закалке. Поэтому при точечной сварке используют более мягкие режимы для уменьшения опасности возникновения раковин и трещин в результате образования структур закалки в литой и околошовной зонах сварного соединения. Структуры закалки повышают хрупкость и снижают пластичность соединений. Для повышения прочности и пластичности необходима термическая обработка в печи или непосредственно в сварочной машине. При сварке этих металлов сила тока ниже (на 25-30%), а давление выше (в 1,5-2 раза), чем при сварке низкоуглеродистой стали.

Низколегированные и углеродистые стали имеют хорошую свариваемость. Повышенное содержание углерода уменьшает окисление металла и облегчает получение соединений, свободных от оксидов. Пластичность соединений повышают подогревом или последующей термической обработкой. В связи с большой прочностью металла при высоких температурах, а также

для предотвращения усадочных дефектов в зоне соединения, сварку ведут при давлениях осадки 80-120 МПа.

Коррозионно-стойкие (нержавеющие) стали обладают высоким электросопротивлением (в 5-6 раз больше, чем у низкоуглеродистой стали), и поэтому для их сварки требуется небольшая сила тока. Из-за высокого коэффициента теплового расширения и опасности возникновения в связи с этим значительных тепловых деформаций сварных узлов, а также из-за склонности некоторых сталей к коррозии при длительном нагреве точечную сварку выполняют на жестких режимах. Высокая прочность металла требует применения повышенных давлений при сварке (250-400 МПа).

Жаропрочные сплавы на Ni и Fe-Ni основах обладают очень высокими прочностью в нагретом состоянии и удельным сопротивлением ρ , в связи с чем ТС и ШС проводят при больших давлениях (600-900 МПа) и временем сварки $t_{св}$ и при малых токах сварки $I_{св}$. Эти сплавы имеют повышенную склонность к внутренним выплескам металла и образованию дефектов усадочного характера в литом ядре, требуют при ССО больших скоростей оплавления (8-10 мм/с) и осадки (более 60 мм/с), необходимых для удаления тугоплавких оксидов из стыка. Давление осадки составляет 450-550 МПа. Для снижения давления осадки используют предварительный подогрев сопротивления зоны сварки.

Титановые сплавы по режимам точечной сварки ($I_{св}$, $t_{св}$) мало отличаются от коррозионно-стойких сталей. При нагреве их пластичность значительно повышается, что позволяет использовать при сварке низкие давления 150-200 МПа. Отсутствие контакта с атмосферой не требует при сварке какой-либо защиты.

Медные сплавы (латуни, бронзы) характеризуются высокой электропроводимостью, теплопроводностью и низкой прочностью при нагреве. Поэтому для сварки медных сплавов используют большие $I_{св}$ при малой $t_{св}$. При точечной сварке латуни ток сварки $I_{св}$ в 3-3,5 раза больше, чем при сварке низкоуглеродистой стали, при практически таких же давлениях. При сварке бронзы сварочные токи несколько меньше в связи с ее более высоким электросопротивлением. Сварка чистой меди представляет определенные трудности и зависит от ее чистоты. Увеличение примесей в меди приводит к повышению хрупкости сварного соединения.

Алюминиевые и магниевые сплавы при точечной сварке требуют применения кратковременных импульсов тока сварки $I_{св}$ большой величины (в 3,5-4 раза больше, чем для низкоуглеродистой стали). При сварке пластичных (неупрочненных) алюминиевых и магниевых сплавов давления практически такие же, как при сварке низкоуглеродистой стали. Сварку сплавов, упрочненных термической обработкой или деформацией, ведут с такими же давлениями, как при сварке коррозионно-стойких сталей. Высокопрочные алюминиевые сплавы при точечной сварке склонны к образованию дефектов усадочного характера (пор, раковин, трещин), поэтому их сваривают с использованием F_k . Отличительной особенностью точечной сварки алюминиевых и магниевых сплавов является активный перенос свариваемого металла

на рабочую поверхность электродов (роликов) и обратно, что вызывает их интенсивное загрязнение, особенно при сварке магниевых сплавов. При наличии значительных загрязнений на поверхности точек и швов снижается стойкость металла к коррозии, и литая зона может выходить на поверхность металла.

В зависимости от марки материала, толщин свариваемых изделий используют основные циклы контактной точечной сварки, показанные в таблице 1.5.

Таблица 1.5. Основные циклы контактной точечной сварки

№ цикла	Характеристика сварки	Циклограмма процесса	Свариваемый металл
I	Одноимпульсная при давлении: постоянном		Низкоуглеродистая сталь толщиной до 6 мм
II	переменном		Низкоуглеродистая сталь толщиной свыше 6 мм, алюминиевые сплавы толщиной до 1,5 мм
III	повышенном в начале и конце		Низкоуглеродистая сталь толщиной более 10 мм, сталь повышенной прочности
IV	Двухимпульсная для сварки и термической обработки с постоянным или переменным давлением		Закаляющиеся стали толщиной до 6 мм (при постоянном давлении) и толщиной более 6 мм (при переменном давлении)
V	Многоимпульсная с удалением током окалины и предварительным подогревом, с переменным давлением		Низкоуглеродистые стали большой толщины (до 30 мм)
VI	Импульсы меняющегося тока с переменным давлением		Алюминиевые сплавы толщиной более 1,5 мм

В таблице 1.6. показана возможность свариваемости различных металлов равной толщины.

Таблица 1.6. Свариваемость различных металлов равной толщины

№	Группа металлов	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
1	Низкоуглеродистые стали	+	-	-	-	-	-	+	+	+	+
2	Низколегированные стали	+	-	-	-	-	-	-	+	+	
3	Коррозионно-стойкие стали	+	-	-	-	-	-	+	+		
4	Жаропрочные сплавы	+	-	-	-	-	-	+			
5	Титановые сплавы	-	-	-	-	+	+				
6	Циркониевые сплавы	-	-	-	-	+					
7	Алюминиевые сплавы	-	-	-	+						
8	Магниевые сплавы	-	-	+							
9	Медные сплавы	-	+								
10	Медно-никелевые сплавы	+									

Условные обозначения: « + » – соединение с общей зоной расплавления и хорошей пластичностью; «-» – общая зона расплавления отсутствует или образуется хрупкое соединение.

На рисунке 1.8. показана связь свойств металлов с параметрами режима сварки.

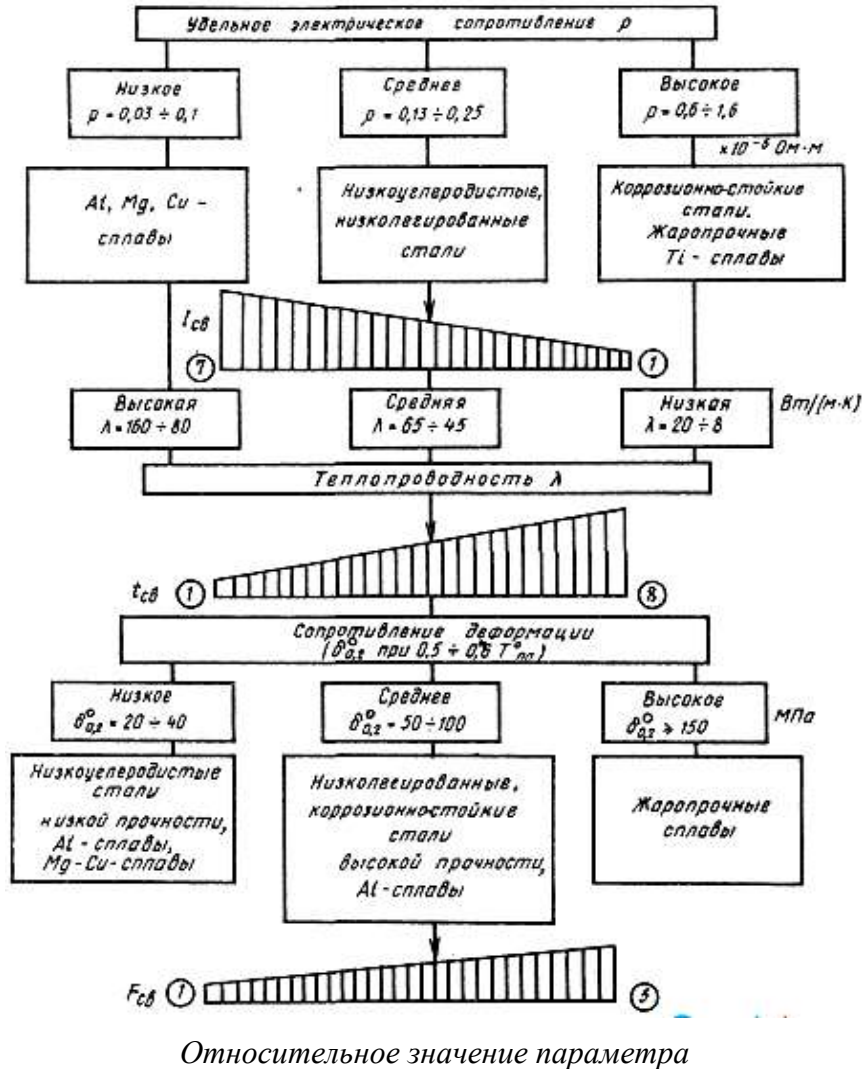


Рис. 1.8. Связь свойств металлов с параметрами режима сварки

1.6. Оборудование для контактной точечной сварки

Для осуществления процесса точечной сварки применяют специальные машины контактной сварки (рис. 1.9), которые в процессе работы выполняют две основные функции – сжатие и нагрев соединяемых деталей. В конструкции любой машины условно можно выделить механическое и электрическое устройства.

Основной частью *механического устройства* машины для точечной сварки (рис. 1.9) служит корпус 1, на котором закреплены нижний кронштейн 2 с нижней консолью 3 и электрододержателем 4 с электродом и верхний кронштейн 7. Нижний кронштейн 2 обычно выполняют переставным или передвижным

(плавно) по высоте, что дает возможность регулировать расстояние между консолями в зависимости от формы и размера свариваемых деталей.

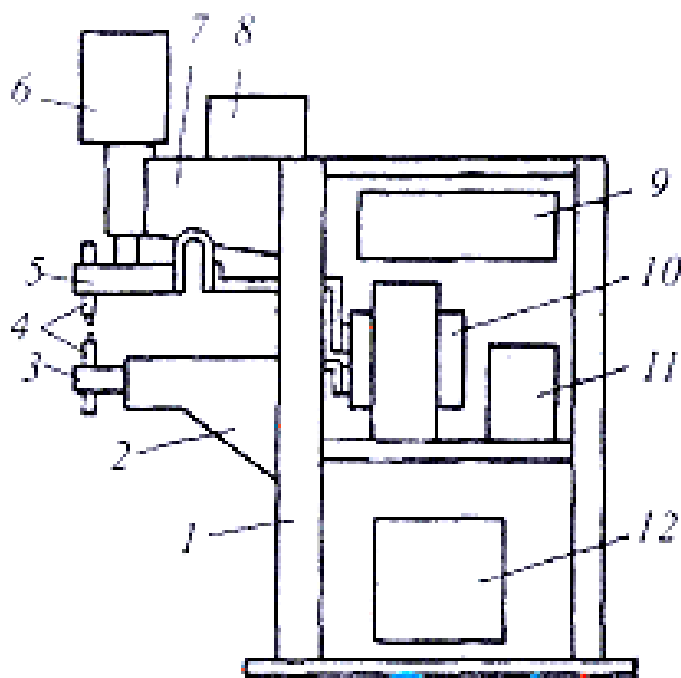


Рис. 1.9. Основные узлы машины для точечной сварки

На верхнем кронштейне установлен пневмопривод усилия сжатия электродов 6, с которым соединена верхняя консоль 5 с электрододержателем 4. Для управления работой пневмопривода на машине установлена соответствующая пневмоаппаратура 8. Привод усилия может быть также пневмогидравлическим, гидравлическим и др. Корпус, верхний и нижний кронштейны и консоли воспринимают усилие, развиваемое пневмоприводом, и, поэтому должны иметь высокую жесткость.

Электрическая часть машины состоит из сварочного трансформатора 1 с переключателем ступеней 2, контактора 12 и блока управления 9. Часто аппаратура управления смонтирована в отдельном шкафу управления. Контактор 12 подключает сварочный трансформатор к электрической питающей сети и отключает его. Электрическое устройство машины предназначено для обеспечения необходимого цикла нагрева металла в зоне сварки. К электрическому устройству относится также вторичный контур машины, который образуют токоподводы, идущие от трансформатора к свариваемым деталям. Ток от трансформатора через жесткие и гибкие шины подводится к верхней 5 и нижней 3 консолям с электрододержателями 4. Консоли и электрододержатели с электродами участвуют в передаче сварочного тока и усилия и поэтому одновременно являются частями электрического и механического устройств машины.

Все части вторичного контура изготавливают из меди или медных сплавов, имеющих высокую электропроводность. Большинство элементов вторичного контура, сварочный трансформатор и контактор имеют внутреннее водяное охлаждение. Технические характеристики сварочной машины МТП-75-9 даны в таблице 1.7.

Таблица 1.7. Технические характеристики сварочной машины МТП-75-9

Параметры	Единицы измерения	Величина показателя
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ		
Первичное напряжение	В	380
Номинальная мощность	кВА	75
Номинальное ПВ	%	20
Номинальный ток в первичной цепи	А	197
Число ступеней регулирований	шт	8
Пределы регулирования вторичного напряжения	В	3,12-6,24
Ориентировочный наибольший сварочный ток	А	12000
Тип контактора	-	Игнитронный, асинхронный или синхронный
Продолжительность включения сварочного тока	с	(0,04-6,75) при синхронном; (0,02-0,38) при синхронном
МЕХАНИЧЕСКИЕ		
Характер действия машины	-	Автоматический
Полезный вылет	мм	500
Ход верхнего электрода	мм	80
Вид привода механизма сжатия	-	Пневматический
Максимальное усилие сжатия	Н	5400
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ		
Максимальная толщина свариваемых деталей при работе с асинхронным прерывателем	мм	2,5+2,5
Максимальная толщина свариваемых деталей при работе с синхронным прерывателем	мм	2+2
Производительность при автоматической работе	Точек в час	4200
ГАБАРИТНЫЕ РАЗМЕРЫ		
высота	мм	2120
ширина	мм	680
длина	мм	1370
Масса машины	кг	650

1.7. Дефекты контактной точечной сварки

При качественном исполнении точечная сварка обладает высокой прочностью и способна обеспечить эксплуатацию изделия в течение длительного срока службы. При разрушениях конструкций, соединенных многоточечной многорядной точечной сваркой, разрушение происходит, как правило, по основному металлу, а не по сварным точкам (рис. 1.10).



Рис. 1.10. Разрушение соединения по основному металлу

Правильно выполненная сварная точка расположена по центру стыка, имеет оптимальный размер литого ядра, не содержит пор и включений, не имеет наружных и внутренних выплесков и трещин, не создает больших концентраций напряжения. При приложении усилия на разрыв, разрушение конструкции происходит не по литому ядру, а по основному металлу.

Дефекты точечной сварки подразделяются на три типа:

- отклонения размеров литой зоны от оптимальных;
- смещение ядра относительно стыка деталей или положения электродов;
- нарушение сплошности металла в зоне соединения;
- изменение свойств (механических, антикоррозионных и др.) металла

сварной точки или прилегающих к ней областей.

Наиболее опасным дефектом считается отсутствие литой зоны (непровар в виде «склейки»), при котором изделие может выдерживать нагрузку при невысокой статической нагрузке, но разрушается при действии переменной нагрузки и колебаниях температуры.

Прочность соединения оказывается сниженной и при больших вмятинах от электродов, разрывах и трещинах кромки нахлестки, выплеске металла. В результате выхода литой зоны на поверхность, снижаются антикоррозионные свойства изделий (если они были).

Непровар полный или частичный, недостаточные размеры литого ядра. Возможные причины: малый сварочный ток, слишком велико усилие сжатия, изношена рабочая поверхность электродов. Недостаточность сварочного тока может вызываться не только его малым значением во вторичном контуре машины, но и касанием электрода вертикальных стенок профиля или слишком близким расстоянием между сварными точками, приводящим к большо-

му шунтирующему току. Данный дефект обнаруживается внешним осмотром, ультразвуковыми и радиационными приборами для контроля качества сварки.

Наружные трещины. Причины: слишком большой сварочный ток, недостаточная сила сжатия, отсутствие усилия проковки, загрязненная поверхность деталей и/или электродов, приводящая к увеличению контактного сопротивления деталей и нарушению температурного режима сварки. Данный дефект можно обнаружить невооруженным глазом или с помощью лупы. Эффективна капиллярная диагностика.

Разрывы у кромок нахлестки. Причина этого дефекта обычно одна – сварная точка расположена слишком близко от края детали (недостаточна нахлестка). Обнаруживается внешним осмотром – через лупу или невооруженным глазом.

Глубокие вмятины от электрода. Возможные причины: слишком малый размер (диаметр или радиус) рабочей части электрода, чрезмерно большое ковочное усилие, неправильно установленные электроды, слишком большие размеры литой зоны. Последнее может являться следствием превышения сварочного тока или длительности импульса. Определяется внешним осмотром.

Внутренний выплеск (выход расплавленного металла в зазор между деталями). Причины: превышены допустимые значения тока или длительности сварочного импульса – образовалась слишком большая зона расплавленного металла. Мало усилие сжатия – не создан надежный уплотняющий пояс вокруг ядра или образовалась воздушная раковина в ядре, вызвавшая вытекание расплавленного металла в зазор. Неправильно (несоосно или с перекосом) установлены электроды. Определяется методами ультразвукового или рентгенографического контроля или внешним осмотром (из-за выплеска может образоваться зазор между деталями).

Наружный выплеск (выход металла на поверхность детали). Возможные причины: включение токового импульса при несжатых электродах, слишком большое значение сварочного тока или продолжительности импульса, недостаточное усилие сжатия, перекося электродов относительно деталей, загрязнение поверхности металла. Две последние причины приводят к неравномерной плотности тока и расплавлению поверхности детали. Определяется внешним осмотром.

Внутренние трещины и раковины. Причины: слишком велики ток или продолжительность импульса. Загрязнена поверхность электродов или деталей. Мала сила сжатия. Отсутствует, опаздывает или недостаточно ковочное усилие. Усадочные раковины могут возникать во время охлаждения и кристаллизации металла. Чтобы воспрепятствовать их возникновению, необходимо повышать силу сжатия и применять проковывающее сжатие в момент охлаждения ядра. Дефекты обнаруживаются методами рентгенографического или ультразвукового контроля.

Смещение литого ядра или его неправильная форма. Возможные причины: неправильно установлены электроды, не очищена поверхность деталей.

Дефекты обнаруживаются методами рентгенографического или ультразвукового контроля.

Прожог. Причины: наличие зазора в собранных деталях, загрязнение поверхности деталей или электродов, отсутствие или малое усилие сжатия электродов во время токового импульса. Во избежание прожогов ток должен подаваться только после приложения полного усилия сжатия. Определяется внешним осмотром.

Исправление дефектов. Способ исправления дефектов зависит от их характера. Самым простым является повторная точечная или иная сварка. Дефектное место рекомендуется вырезать или высверлить. При невозможности сварки (из-за нежелательности или недопустимости нагрева детали), вместо дефектной сварной точки можно поставить заклепку, высверлив место сварки. Применяются и другие способы исправления – зачистка поверхности в случае наружных выплесков, термическая обработка для снятия напряжений, правка и проковка при деформации всего изделия.

1.8. Способы исправления дефектов

На практике применяют следующие основные способы исправления дефектов в сварных соединениях:

- точечную или роликовую сварку;
- механическую обработку дефектного места и дуговую сварку в среде защитных газов;
- сверление отверстия и постановку заклепки;
- механическую обработку (зачистку) поверхности сварных швов;
- термическую обработку соединения или узла.

При полном отсутствии соединения деталей (зазор) производят повторную сварку на измененном режиме или, если возможно, изменяют место сварки. Если литые зоны точек имеют малые размеры, внутренние трещины или выплески, то исправление дефектов может быть выполнено постановкой сварных точек на расстоянии полушага от дефектной.

Режим сварки по току должен быть соответствующим образом изменен. Внутренние трещины и раковины в центре литой зоны точек хорошо устраняются повторной сваркой с увеличением величины тока на 15...20%. При исправлении дефектов в точечных соединениях клепкой, последнюю, если требуется герметичность, выполняют с использованием соответствующего герметика. При сверлении отверстий под заклепки в тонких деталях необходимо принять меры, исключающие образование надрывов и трещин по краям отверстия.

Дефекты в виде *наружных* трещин и других нарушений поверхностной сплошности металла сварных соединений, выполненных точечной сваркой, на одной из деталей можно исправлять двумя способами (рис. 1.11).

При первом способе на поверхность детали с наружной трещиной I накладывают пластину и соединяют ее точечной сваркой с верхней деталью II (рис. 1.11а). Затем отрывают пластину от верхней детали III и производят механическую обработку выступа IV.

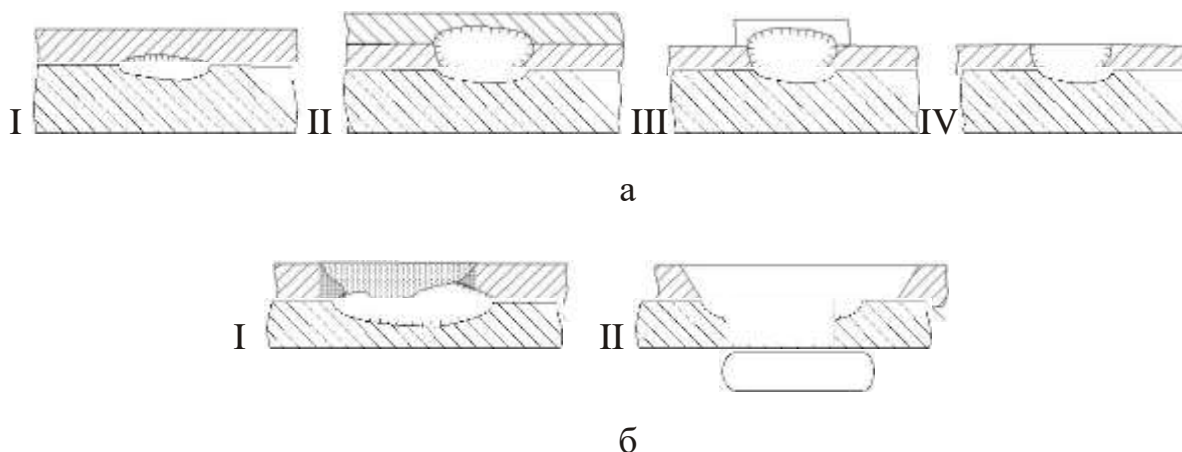


Рис. 1.11. Исправление дефектов точечной сварки:
 а – с помощью наложения пластины;
 б – с помощью специальной заклепки

При значительном оплавлении поверхности одной из деталей I (рис. 1.11б) исправление выполняют с помощью заклепки специальной формы II. Дефекты наружной поверхности устраняют шабером, стальной проволочной щеткой из нержавеющей стали или абразивным кругом на резиновой основе. Дефекты в виде искажения формы и размеров сварных узлов, вследствие напряжений и деформаций, возникающих в результате сварки, исправляют путем местного нагрева, постановки «холостых точек», прокаткой между стальными роликами, а также правкой ударом и обжатием сварных точек.

1.9. Контроль качества соединений точечной сваркой

При возникновении дефектов в точечных соединениях могут изменяться заданные механические и антикоррозионные свойства, качество поверхности и эксплуатационные характеристики сварных узлов. Отсутствие взаимного проплавления деталей или малые размеры литой зоны резко снижают статическую и динамическую прочность. Прочность снижается также при наличии следующих дефектов: выхода литой зоны на поверхность деталей из высокопрочных алюминиевых сплавов, больших вмятин от электродов, разрывов и трещин кромки нахлестки и внутренних выплесков. Последние существенно увеличивают разброс прочности сварных точек. Большие зазоры между деталями после сварки снижают динамическую прочность соединений.

Рассматривая влияние на прочность внутренних пор, раковин и трещин, следует отметить, что дефекты, находящиеся в центральной части литой зоны, оказываются вне действия максимальных напряжений при нагружении и поэтому внутренние дефекты, не выходящие за пределы $1/3$ литой зоны, не снижают статической и динамической прочности соединений. Однако внутренние трещины следует считать серьезным дефектом, так как они даже при незначительном изменении условий сварки (режима, состояния электродов, подготовки поверхности) могут превратиться в наружные трещины, которые резко снижают динамическую прочность соединений. Выход литой зоны на поверхность, перенос металла электродов на детали, а также нарушение пла-

кирующего слоя, например, вследствие местных оплавлений металла, снижают коррозионную стойкость сварных соединений высокопрочных алюминиевых сплавов. Большие вмятины от электродов, подрезы на поверхности роликовых швов и выдавливание металла ухудшают качество наружной поверхности узлов.

При внутреннем выплеске в зазоре между деталями остаются металлические частицы, которые могут выпадать оттуда в процессе эксплуатации сварного узла. Если зазор нахлестки имеет выход в полость емкости для жидкости или газов, то металл выплесков может засорять трубопроводы, фильтры и т.п., вызывая выход из строя узла или всей конструкции. В таких случаях металл выплесков, вышедший из зазора между деталями, удаляют механическим путем или подвергают сварной узел вибрации для удаления выплесков из зазора.

Наиболее опасны *непровары* сварного соединения, так как размеры ядра определяют основные эксплуатационные характеристики (прочность, герметичность). Выплески (наружные и внутренние) ухудшают вид изделия, могут попадать в магистрали и засорять их. *Трещины и раковины* в основном влияют на герметичность и, в меньшей степени, на прочность, так как находятся вне зоны наибольших рабочих напряжений на границе ядра или уплотняющего пояса.

Обычно при контактной сварке используется сквозной контроль, начиная с контроля оборудования, приспособлений, состояния поверхности деталей и электродов, качества сборки и, наконец, качества сварных соединений. Технологическая проба (механический метод) – наиболее распространенный вид испытаний образцов и конструкций. При этом разрушают сварные точки, затем из образцов вырезают шлифы и по ним уточняют диаметр ядра и определяют его высоту, степень перекрытия точек в шве, наличие внутренних выплесков и несплошностей.

Параметры режима измеряют специальными приборами. Сварочный ток замеряют амперметрами, трансформаторами тока или с помощью шунтов и других средств. Известна также аппаратура, например КАСТ-2М, для автоматической регистрации отклонений тока от установленного значения.

Контроль *соединений* в готовых элементах и конструкциях – весьма сложная проблема при контактной сварке. Для этой цели используется *рентгеновское* просвечивание. Обычно, таким образом, хорошо выявляются несплошности – трещины, раковины, выплески. Размеры ядра удается определить лишь при введении под нахлестку рентгеноконтрастных материалов в виде порошка (суспензии) или фольги с тяжелыми элементами – карбидами вольфрама, серебра, церием.

Из других способов неразрушающего контроля следует отметить попытки использовать *вихревые токи* для определения размеров ядра (например, прибором ДСТ-5РПИ) в соединениях из стали и сплавов алюминия. Однако при этом достоверность контроля во многом зависит от глубины вмятины, величин зазоров между деталями и т.п.

За последние годы в этой области возникли принципиально новые технологические решения, позволяющие минимизировать временные и материальные затраты, возникающие в процессе диагностики сварных швов. Это, прежде всего, ультразвуковой контроль, позволяющий с помощью ультразвуковых колебаний сканировать даже самые сложные внутренние поверхности и объекты.

Метод основан на свойстве волн изменять частоту колебаний или скорость распространения на неоднородных участках. Такая технология позволяет быстро обнаруживать поверхностные и глубинные дефекты сварных швов и других ответственных участков. Например, велосимметрический метод, основанный на измерении скорости распространения упругих волн на соединительных и многослойных участках, особенно эффективен для дефектоскопии соединений точечной сваркой.

Ультразвуковой дефектоскоп BondMaster 1000 e⁺ – это универсальный многофункциональный прибор, с возможностью контроля резонансным, импедансным и акустическими методами с отдельно-совмещёнными преобразователями: импульсным, велосимметрическим и радиочастотным методами.

Благодаря наличию ультразвуковых дефектоскопов, сварка и контроль могут быть единым технологическим процессом, обеспечивающим продолжительную жизнь сварным швам. Широкое распространение получил *ультразвуковой дефектоскоп* EPOCH 4, который сочетает в себе мощные возможности измерения, внутренний регистратор данных и большой набор программного обеспечения для решения широкого круга задач. Он снабжен прочным корпусом и удобно организованной клавиатурой прямого доступа. Регистратор данных позволяет сохранять данные на месте проведения работ с последующей передачей на ПК в интерфейсную программу. Ультразвуковой дефектоскоп EPOCH 4PLUS является развитием модели EPOCH 4 (рис. 1.12).

В дефектоскопах и программном обеспечении фирмы Panametrics-NDT (ПО для EPOCH 4PLUS) был реализован подход к контролю точечной сварки, основанный на опыте высококвалифицированных операторов, использующих стандартные дефектоскопы для получения А-Скана и далее анализирующих различные модели формы волны. Оснащение этих приборов мощными аккумуляторными батареями предоставляет возможность выполнять работы в полевых условиях.



Рис. 1.12. Ультразвуковой дефектоскоп EPOCH 4PLUS и ПО

1.10. Преимущества и недостатки контактной точечной сварки

Большая востребованность точечной сварки обусловлена целым рядом достоинств, которыми она обладает. В их числе:

- возможность сварки тонких и очень тонких деталей из металлов различной природы (в том числе и дорогостоящих или легкоплавких сплавов). Во многих случаях такая возможность бывает весьма полезной, а аппарат точечной сварки – незаменимой машиной;

- хорошие прочностные характеристики сварочного соединения, а также хороший внешний вид соединений. Соединения, полученные контактной сваркой, не подвержены старению, структура металла в зоне сварки практически не меняется, за исключением некоторого увеличения размера зерен;

- высокую производительность контактной точечной сварки. Существуют машины контактной точечной сварки, позволяющие выполнять до восьмисот сварочных точек в минуту;

- возможность полной автоматизации процесса точечной сварки. Все большее распространение приобретают автоматизированные машины контактной сварки, сварочные роботы и т.д. Это позволяет существенно сократить затраты труда, снизить себестоимость оборудования и повысить продуктивность работы;

- экономичное расходование электродов, электрической энергии и других материалов. Себестоимость сварных точек также достаточно низка – хотя аппарат точечной сварки стоит достаточно дорого, за счет экономичного расходования материалов, высокой производительности аппарата и длительного срока службы себестоимость этого бесспорно не заменимого оборудования получается низкой;

- низкие требования к квалификации персонала – для того, чтобы использовать аппарат точечной контактной сварки, вовсе не обязательно быть высококвалифицированным специалистом.

К недостаткам можно отнести:

- отсутствие герметичности шва;
- концентрация напряжений в точке сварки.

Концентрация напряжений может быть уменьшена или вообще устранена особыми технологическими приемами.

Точечную сварку чаще всего применяют для соединения листовых заготовок внахлестку, реже – для сварки стержневых материалов. Диапазон толщин, свариваемых ею, составляет от нескольких микрометров до 20 мм, однако чаще всего толщина свариваемого металла варьируется от десятых долей до 5-6 мм.

1.11. Техника безопасности при выполнении лабораторной работы

Общие указания

Лабораторная работа выполняется студентами под руководством преподавателя. Перед лабораторной работой преподавателем проводится инструктаж по технике безопасности, где особое внимание обращается на конкретные условия выполнения работы, исключающие возможность получения травм.

В процессе выполнения лабораторной работы студенты должны находиться в зоне расположения установки, которая используется в данной работе. Студенты должны четко и неукоснительно выполнять указания и распоряжения преподавателя, быть собранными и внимательными, соблюдать требования запрещающих и предупредительных надписей, имеющихся на экспериментальных установках, испытательных машинах.

Включение нагружающих устройств, испытательных машин и т.п. должно производиться только с разрешения преподавателя, под его контролем. Успешное выполнение каждой лабораторной работы возможно только при обязательном соблюдении правил техники безопасности.

Выключение нагружающих устройств, испытательных машин должно производиться только с разрешения преподавателя, под его контролем.

Средства защиты

Основная угроза при работе со сварочным оборудованием – поражение электрическим током и высокой температурой. Для предотвращения поражения электрическим током необходимо соблюдать такие меры безопасности, как заземление тех частей оборудования, которые должны быть заземлены, проверка исправности оборудования перед работой, использование средств защиты. Управляющие элементы аппарата для точечного соединения металлических деталей не должны быть под высоким напряжением. Все провода должны иметь достаточное сечение.

При контактной точечной сварке выделяются брызги и пары металла. Для предотвращения ожогов брызгами металла сварщик должен использовать рукавицы, спецодежду и очки с прозрачными стеклами либо головной щиток. Пары

металла могут быть вредны для здоровья, поэтому необходимо использовать вентиляцию, а при необходимости – средства защиты органов дыхания.

Меры безопасности

Все блокировочные устройства и устройства быстрого отключения аппарата точечной сварки должны быть исправны, находиться на виду, к ним должен быть легкий доступ.

При проведении таких технических работ, как зачистка или смена электродов, нужно соблюдать меры, исключающие возможность смещения электрода и травмирования рук. При работе аппарата точечной сварки пространство зажимных механизмов нужно закрывать щитком, а при работе на мощных машинах – огораживать ширмами.

Должна быть исключена возможность травмирования сварщика движущимися частями аппарата точечной сварки.

Порядок выполнения работы

К работе допускаются студенты, которые прошли инструктаж по правилам техники безопасности.

1. Ознакомиться с конструкцией сварочной машины. Опробовать работу сварочной машины без включения сварочного тока, включить и отрегулировать контрольные приборы.

2. Выбрать режим сварки образцов заданной марки материала и толщины.

3. Сварить образцы для испытаний соединений на срез или на отрыв на режимах, отличающихся от выбранного, изменяя величину сварочного тока, длительность его протекания или усилие сжатия деталей.

4. Испытать сварные образцы на срез или отрыв, определить разрушающее усилие на точку, установить характер разрушения соединения. В отчете следует обобщить полученные данные.

5. Занести табличные и фактические данные в бланк отчета.

6. Выключить электрическое питание сварочной машины приборов, перекрыть трубопроводы воздуха и воды, убрать рабочее место.

Содержание отчета

1. Упрощенная схема сварочной машины с обозначением основных узлов, циклограмма ее работы.

2. Эскизы образцов для испытаний соединения на срез или отрыв.

3. График зависимости разрушающего усилия от величины исследуемого параметра режима сварки.

4. Краткие выводы по работе, в которых необходимо отметить влияние параметров режима сварки на прочность соединений, описать характер разрушения сварных соединений при испытаниях, сопоставить требуемую и фактическую прочность сварных соединений.

Контрольные вопросы

1. Как осуществляется нагрев места соединения при контактной точечной сварке?
2. Из каких основных узлов состоят машины для контактной точечной сварки?
3. Какие виды контактной сварки применяются в аэрокосмической отрасли?
4. Из каких этапов складывается цикл точечной сварки?
5. Какие изделия свариваются точечной сваркой?
6. Как определить диаметр сварной точки?
7. Какие параметры оказывают влияние на качество сварной точки?
8. Какие требования предъявляются к подготовке поверхностей заготовок при точечной сварке?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКИ В ВАКУУМЕ НА ПРОЧНОСТЬ СОЕДИНЕНИЯ

Цель работы: практическое ознакомление с оборудованием и методикой выбора режима сварки, исследование влияния параметров режима на прочность сварных соединений.

Задание для выполнения лабораторной работы:

1. Изучить теоретическую часть.
2. Изучение оборудования и особенности диффузионной сварки.
3. Выбрать режим сварки двух образцов и произвести их диффузионную сварку.
4. Оценить прочность сварного соединения на срез.

2.1. Общие сведения о диффузионной сварке в вакууме

Диффузионная сварка в вакууме является одним из перспективных способов получения неразъемных соединений из разнообразных материалов. Наиболее ярко преимущества диффузионной сварки проявляются при соединении трудносвариваемых и разнородных материалов.

Диффузионная сварка входит в группу способов сварки давлением, при которых соединение получается за счет пластической деформации микронеровностей на поверхности свариваемых заготовок при температуре ниже температуры плавления. Отличительной особенностью является применение повышенных температур при сравнительно небольшой остаточной деформации. Ее технологическая характеристика была предложена Н.Ф. Казаковым и принята Международным институтом сварки в следующей формулировке: «Диффузионная сварка материалов в твердом состоянии – это способ получения неразъемного соединения, образовавшегося вследствие возникновения связей на атомарном уровне, появившихся в результате сближения контактных поверхностей за счет локальной пластической деформации при повышенной температуре, обеспечивающей взаимную диффузию в поверхностных слоях соединяемых материалов».

Диффузионная сварка осуществляется в твердом состоянии металла при повышенных температурах с приложением сдвливающего усилия к месту сварки.

При диффузионной сварке выделяют две основные стадии образования сварного соединения.

Первая стадия – создание физического контакта, при котором все точки соединяемых материалов находятся друг от друга на расстоянии межатомных взаимодействий. При этом на линии раздела двух деталей создаются условия для образования металлических связей. Для возникновения на линии раздела металлических связей необходимо обеспечить тесный контакт свариваемых

поверхностей и создать условия для удаления поверхностных пленок окислов, жидкостей, газов и различного рода загрязнений.

Удаление поверхностных пленок и предупреждение возможности образования их в процессе сварки достигается использованием вакуумной защиты и тщательной предварительной зачисткой свариваемых поверхностей.

Вторая стадия – формирование структуры сварного соединения под влиянием процессов диффузии. На этой стадии происходят процессы взаимной диффузии атомов свариваемых металлов. Эти процессы приводят к образованию промежуточных слоев, увеличивающих прочность сварного соединения.

2.2. Влияние технологических параметров процесса сварки на качество соединения

Параметрами, определяющими процесс соединения при диффузионной сварке в вакууме, являются;

1. Глубина вакуума или степень разряжения атмосферы;
2. Температура сварки;
3. Давление сжатия;
4. Время сварки;
5. Шероховатость поверхности.

Существенное влияние на процесс диффузионного соединения оказывает шероховатость соединяемых поверхностей. Она влияет не только на создание физического контакта, но и в значительной степени определяет протекание диффузионных процессов за счет изменения тонкой структуры поверхностных слоев. Поэтому важное значение для получения качественного соединения имеют качество подготовки поверхностей. Предварительная обработка свариваемых деталей (рельеф) влияет не только на создание физического контакта, но и в значительной степени определяет протекание диффузионных процессов за счет изменения тонкой структуры поверхностных слоев.

Подготовка заготовок в общем случае может складываться из механической обработки, очистки от загрязнений и нанесения подслоев. Механическая обработка обеспечивает:

- возможно, более плотное начальное прилегание свариваемых заготовок;
- удаление с поверхности загрязненного слоя;
- повышение размерной точности готового изделия;
- возможность снижения температуры, давления и времени сварки с улучшением микрогеометрии поверхности.

Способы подготовки и обработки поверхностей свариваемых деталей оказывают большое влияние на прочность соединения при диффузионной сварке в вакууме (рис. 2.1).

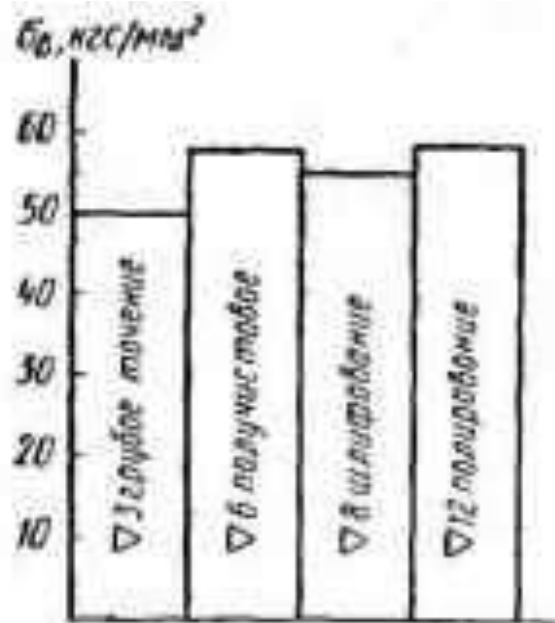


Рис. 2.1. Зависимость прочности сварного соединения из стали 45 от чистоты обработки поверхности перед сваркой

Очистка поверхностей от загрязнений (следов жиров, масла, полировальной пасты) может проводиться растворителями (ацетон, спирт, четыреххлористый углерод и др.), путем нагрева и выдержки в вакуумной камере. В отдельных случаях применяют отжиг заготовок в среде водорода. Положительные результаты получают при обработке в растворах кислот H_2SO_4 и HCl с последующими промывкой и сушкой. При сварке изделий из некоторых сортов керамики после механической обработки заготовки отжигают с целью «залечивания» поверхностных дефектов. Для этого же проводят травление стекла в плавиковой кислоте.

Любая подготовка свариваемых поверхностей (механическая, электролитическая, химическая и др.) не исключает образование оксидов на поверхности металла. Однако этот фактор не всегда оказывает отрицательное влияние на протекание процесса, так как для большинства металлов нагрев в вакууме до температуры, используемой при сварке ((0,7–0,8) $T_{пл}$), и соответствующая выдержка во времени при этой температуре достаточны для самопроизвольной очистки свариваемых поверхностей от оксидов.

Для выбора температуры, давления и времени нет строгих рекомендаций. Высококачественные соединения можно получать, изменяя в определенных пределах значения каждого из этих параметров с соответствующей корректировкой других. При выборе их значений необходимо учитывать особенности свариваемых материалов и требования к изделию: возможность разупрочнения из-за роста зерна, ограничения по температуре нагрева и деформации изделия и т.п.

Давление сжатия способствует формированию фактического контакта соединяемых поверхностей, а также их активации. Давление, применяемое при способах сварки без расплавления материалов, выполняет три задачи:

- разрушение в результате пластического течения поверхностных слоев металла и частичное удаление окисных пленок и загрязнений;
- сближение свариваемых поверхностей для обеспечения физического контакта и эффективного атомного взаимодействия;
- обеспечение активации поверхностей для протекания процессов диффузии и рекристаллизации.

Давление выбирают в диапазоне 0,8...0,9 предела текучести при температуре сварки. Для известных конструкционных материалов оно может изменяться в диапазоне 1...50 МПа. Для сварки тугоплавких и твердых материалов эти значения могут быть в несколько раз выше. Обычно при охлаждении деталей сжимающее усилие снимают при достижении температуры 100-400°C (373-673 К). Преждевременное снятие сжимающего усилия при охлаждении деталей в некоторых случаях приводит к разрушению сварного соединения.

В практике диффузионной сварки известно применение двух технологических схем процесса, различающихся характером приложения нагрузки. В одной из них используют постоянную нагрузку по величине ниже предела текучести. При этом процессы, развивающиеся в свариваемых материалах, аналогичны ползучести. Такую технологию называют диффузионной сваркой по схеме свободного деформирования. По второй схеме нагрузка и пластическое деформирование обеспечиваются специальным устройством, которое перемещается в процессе сварки с контролируемой скоростью. Такую технологию называют диффузионной сваркой по схеме принудительного деформирования. Этот процесс осуществляют при напряжениях, как правило, превышающих предел текучести.

Для предотвращения образования интерметаллидов в зоне сварного соединения эффективен прием заметного сокращения времени сварки. На практике этот прием реализован так называемой «ударной сваркой в вакууме». Суть способа в том, что к локально нагретым зонам контакта детали «прикладывается» одиночный импульс силы со скоростью 1...30 м/с. В свариваемых деталях под воздействием динамической нагрузки происходят локальная пластическая деформация в зоне контакта и образование сварного соединения. Сварное соединение образуется за 1...10 м/с.

Процесс может осуществляться с использованием различных тепловых источников нагрева. Чаще всего на практике находят применение индукционный, радиационный, электронно-лучевой нагрев, а также нагрев проходящим током, тлеющим разрядом и в расплаве солей.

Диффузионная сварка в большинстве случаев проводится в вакууме. От глубины вакуума зависит скорость и качество зачистки соединяемых поверхностей от поверхностных плёнок. Чем выше степень вакуума, тем интенсивнее протекают эти процессы. Глубина вакуума, при которой обычно происходит сварка, составляет примерно 10⁻²-10⁻³ Па. Использование более высо-

кого вакуума оправдано, когда необходимо обеспечить высокую размерную точность изделия (уменьшение остаточной деформации заготовок) за счет соответствующего снижения температуры, давления и времени. Тугоплавкие металлы удается таким образом сваривать при температурах ниже порога рекристаллизации и тем самым избегать охрупчивания материала.

Широко применяют в качестве защитных сред инертные (аргон, гелий) и активные газы (водород, реже углекислый газ). Состав защитного газа подбирают исходя, в первую очередь, из химической активности системы металл-газ в условиях сварки.

Температура сварки является основным параметром процесса, она определяет условия термовакуумной очистки и образование физического контакта соединяемых поверхностей, влияет на скорость и характер протекания диффузионных процессов. Температуру сварки обычно назначают в пределах (0,5...0,8) $T_{пл}$, для жаропрочных сплавов – несколько выше. При соединении разнородных материалов расчет ведется по температуре плавления наиболее легкоплавкого из них. В случае появления эвтектики температуру сварки выбирают ниже температуры ее плавления.

Время выдержки в зависимости от температуры, давления, допустимой остаточной деформации, чистоты обработки контактных поверхностей и деформационной способности материала может колебаться от нескольких секунд до нескольких часов. Оно определяет полноту протекания диффузионных процессов на завершающих этапах образования соединения.

Скорость охлаждения в большинстве случаев не регламентируется. При сварке разнородных сочетаний материалов, термический коэффициент линейного расширения которых различается более чем на $2 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹, скорость охлаждения целесообразно уменьшать до 10...15°С/мин. Разгерметизацию камеры при сварке деталей из черных металлов рекомендуют проводить при температуре $\leq 120^\circ\text{C}$, а для цветных и активных металлов – при 60°C .

Влияние температуры в диапазоне 800-1100°С (1073-1373 К) на прочность соединения из стали 50 при различных давлениях: 0,5; 1,2 и 5 кгс/мм² приведено на рисунке 2.2. Продолжительность сварки 5 мин, разрежение 10⁻³ мм рт. ст. (133-10⁻³ Н/м²). Кривая 1 показывает, что при увеличении температуры с 800 до 900°С (с 1073 до 1173 К) прочность соединения увеличивается в 2 раза, а при повышении температуры до 1100°С (1373 К) – в 3 раза.

В несколько меньшей степени температура оказывает влияние при давлении 1 кгс/мм² (9,8 МН/м²). При давлении 2 и 5 кгс/мм² (19,6 и 49,0 МН/м²) прочность соединения увеличивается лишь до температуры 1000°С (1273 К). При температуре 1100°С (1373 К) наблюдается незначительное уменьшение прочности соединения.

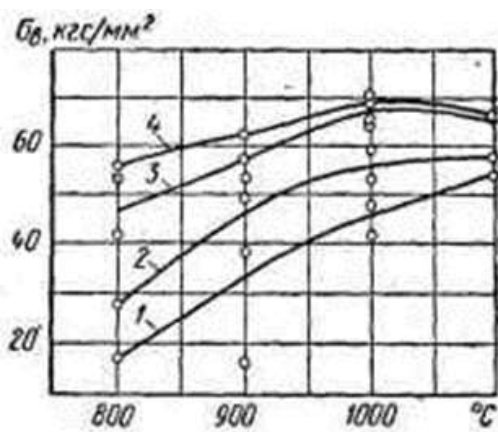


Рис. 2.2. Зависимость прочности сварного соединения (сталь 50) от температуры сварки (время сварки 5 мин) и давления в процессе сварки: 1-0,5 кгс/мм²; 2-1 кгс/мм²; 3-2 кгс/мм²; 4-5 кгс/мм²

При увеличении давления (рис. 2.3) от 0,5 до 2 кгс/мм² (от 4,9 до 19,6 МН/м²) прочность соединения значительно растет для 800, 900, 1000, 1100°C (1073, 1173, 1273, 1373 К). Дальнейшее увеличение давления от 2 до 5 кгс/мм² (от 19,6 до 49,0 МН/м²) сказывается незначительно на прочности соединения. Изменение прочности соединения при увеличении давления до 2 кгс/мм² (19,6 МН/м²) и выше можно объяснить главным образом увеличением площади фактического контакта между соединяемыми поверхностями.

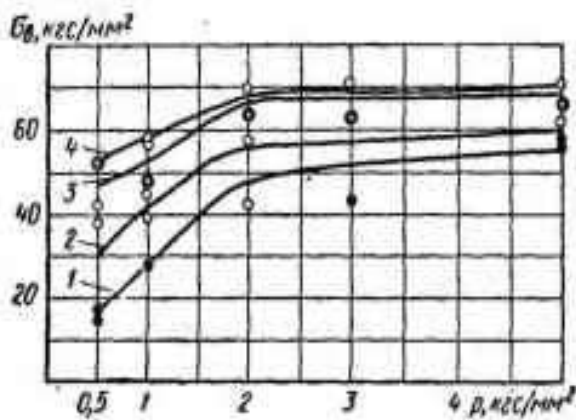


Рис. 2.3. Зависимость прочности сварного соединения (сталь 50) от давления и температуры (время сварки 5 мин): 1 – T = 800°C; 2 – T = 900°C; 3 – T = 1000°C; 4 – T = 1100°C

Повышение температуры при постоянной продолжительности сварки и прочих равных условиях увеличивает прочность соединения. Продолжительность сварки аналогично влияет на все прочностные характеристики (рис. 2.4). Зависимость прочности получаемого соединения из стали 45 от температуры и давления изображена на рисунке 2.5 поверхностью, которая при пересечении с горизонтальной плоскостью p-T образует границу свариваемости.

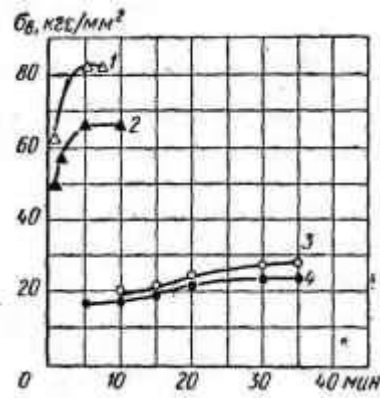


Рис. 2.4. Зависимость прочности сварного соединения от продолжительности сварки: 1 – титановый сплав ВТИ; 2 – сталь 45; 3 – сталь Н28К18; 4 – медь М1

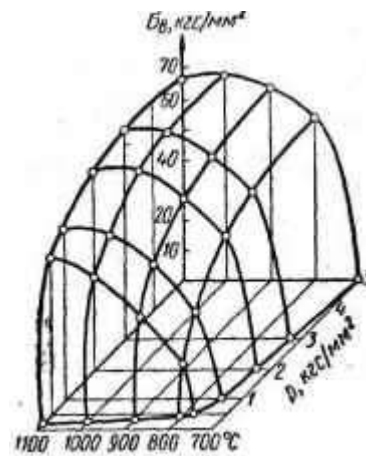


Рис. 2.5. Диаграмма зависимости прочности сварного соединения из стали 45 от температуры и давления

С увеличением продолжительности сварки прочность сварного соединения растет (рис. 2.6), увеличение продолжительности сварки сверх оптимального практически не влияет на прочность сварного соединения. Однако чрезмерное увеличение выдержки приводит даже к снижению прочности сварного соединения. Аналогичным образом влияет продолжительность процесса на пластичность, относительное удлинение и ударную вязкость.

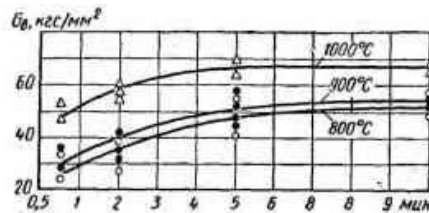


Рис. 2.6. Зависимость прочности образцов сварных соединений от продолжительности сварки ($p = 2 \text{ кгс/мм}^2$)

Значительное влияние оказывает конечная температура охлаждения образцов в вакууме на прочность и пластичность (рис. 2.7); режим сварки: $T = 1000^\circ\text{C}$ (1273 К), $p = 2 \text{ кгс/мм}^2$ (19,6 МН/м²), $t = 5 \text{ мин}$. Охлаждение до более низких температур под сжимающим давлением сваренных деталей в вакуумной камере способствует повышению прочности и пластичности соединения.

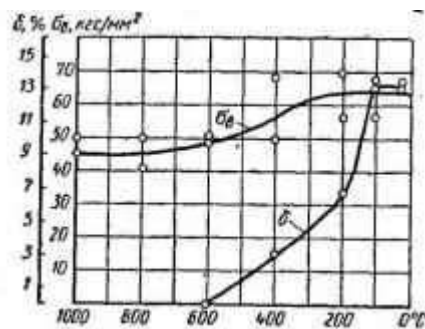


Рис. 2.7. Зависимость прочности и пластичности соединения из конструкционной стали от конечной температуры охлаждения в вакууме

Вместе с тем не все металлы одинаково хорошо свариваются данным способом. При сварке ряда сочетаний разнородных металлов и сплавов в зоне соединения могут образоваться хрупкие фазы, снижающие его прочность. Например, если сваривать сталь с алюминием, то в зоне сварки будут образовываться хрупкие соединения – интерметаллиды Fe_3Al , как следствие соединение будет хрупким – сварка некачественной. Эта проблема решается путем установки между свариваемыми деталями медной прокладки (медная фольга, меднение торцов свариваемых деталей).

Широко распространённым технологическим приёмом для улучшения соединения является использование прослоек тонких слоёв металла, которые помещаются между соединяемыми поверхностями. Промежуточные прокладки могут быть расплавляющимися и нерасплавляющимися. Применение прослоек расширяет область применения этого сварочного процесса. Промежуточные прокладки на свариваемые поверхности наносят с целью:

- увеличения прочности сцепления (сваривания);
- предотвращения появления нежелательных фаз при сварке разнородных материалов (барьерные подслои);
- интенсификации стадии объёмного взаимодействия;
- облегчения установления физического контакта по всей свариваемой поверхности за счет использования подслоев из пластичных материалов;
- снижения температуры и давления при сварке и, значит, уменьшения остаточных деформаций.

Материал барьерной прокладки должен выбираться так, чтобы коэффициент его диффузии в основной материал был выше, чем для элементов основного металла в прокладку.

В качестве расплавляющихся прокладок наиболее часто используют высокотемпературные припои. Их применение позволяет уменьшить давление сжатия и пластические деформации, облегчает удаление оксидных пленок, повышает эксплуатационные свойства соединений.

Так, например, для низколегированных сталей благоприятны прокладки из меди и серебра, а для легированных – титан. Для соединения керамики с металлом используют сплавы с добавками активных металлов, окислы которых имеют более высокую теплоту образования, чем окислы, образующие основу керамики. Сплав ВК8 со сталью 20 соединяют через никелевую фольгу толщиной 0,1 мм.

2.3. Оборудование для диффузионно-вакуумной сварки

При выполнении лабораторной работы используют установки типа УДС-2, А306, МДВ-301, отличающиеся конструктивным исполнением и габаритными размерами (табл. 2.1). В компоновочном отношении они состоят из:

- корпуса с вакуумной камерой;
- системы вакуумирования;
- системы для сжатия свариваемых деталей;
- источника нагрева;
- системы водяного охлаждения вакуумной камеры;
- индуктора;
- механического и диффузионного пароструйного вакуумного насосов;
- аппаратуры управления и контроля.

Таблица 2.1. Основные характеристики установок для диффузионной сварки

Тип установки	Мощность, кВт	Температура нагрева, К	Усилие сжатия, кН	Разрежение, Па	Масса, кг
УДС-2	25	1773	100	$6,7 \cdot 10^{-3}$	1450
А306-08	25	1373	100	$6,7 \cdot 10^{-3}$	450
МДВ-301	100	1773	30	$6,7 \cdot 10^{-3}$	4500

Примечание. Нагрев – индукционный, размер вакуумных камер 0,4×0,5 м

Принципиальная схема установки для диффузионной сварки в вакууме представлена на рисунке 2.8. Две детали 5, например, 1 – сталь 20ХНА и 2 – бронзой БрО10 устанавливаются в «вакуумно-плотной» камере – 1 на стол для крепления деталей – 6. Из этой камеры вакуумным насосом откачивается воздух до получения в этой камере давления равного $10^{-4} \dots 10^{-5}$ мм. рт. столба ($10^{-3} \dots 10^{-4}$ МПа). Далее с помощью гидравлической (механической) системы – 2 на свариваемые детали 5 через поршень 3 подается давление. Обе детали нагреваются с помощью индуктора 4 до заданной температуры.

По значению разрежения в сварочной камере установки подразделяют на три основные группы: с низким (до $1,3 \cdot 10^{-1}$ Па), средним ($1,3 \cdot 10^{-1} \dots 10^{-3}$ Па), высоким (свыше $1,3 \cdot 10^{-3}$ Па) разрежением. Во всех установках для ДСВ применяют динамический принцип вакуумирования сварочной камеры (постоянная откачка в процессе всей сварки).

Для нагрева деталей используется высокочастотный индукционный способ. При этом способе детали, помещенные в магнитное поле индуктора, по которому протекает высокочастотный ток, нагреваются индуктированными в них вихревыми токами (токами Фуко). Величина тока Фуко пропорциональна числу витков w индуктора, магнитному потоку Φ вокруг него, частоте тока в индукторе и обратно пропорциональна сопротивлению R свариваемых деталей.

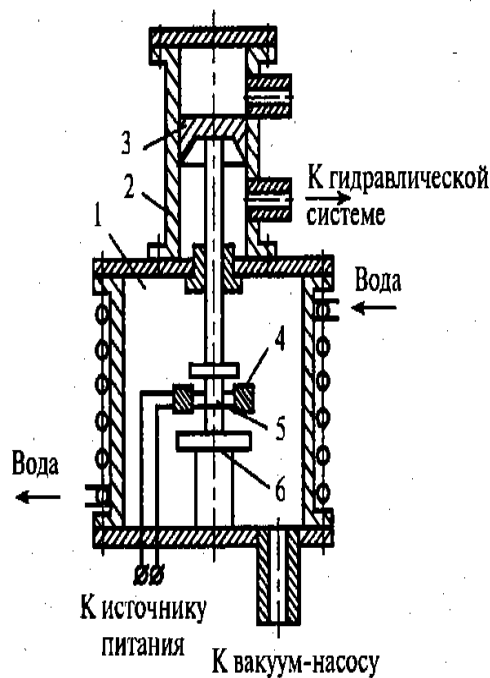


Рис. 2.8. Принципиальная схема установки для диффузионной сварки в вакууме:
 1 – вакуумная камера; 2 – цилиндр гидропривода; 3 – поршень; 4 – индуктор;
 5 – свариваемые детали; 6 – стол для крепления деталей

Для индукционного нагрева при диффузионной сварке используют ламповые генераторы токов высокой частоты, работающие в диапазоне 60...500 кГц мощностью до 20 кВт для небольших деталей и машинные генераторы с частотой тока 500...10000 Гц мощностью до 200 кВт для толстостенных изделий. Отличительной особенностью индукционного нагрева является бесконтактная передача энергии от индуктора к детали через зазор 1...20 мм. При этом теплота генерируется непосредственно в самих деталях как результат преобразования электромагнитной энергии. Однако этот метод неприменим при сварке диэлектрических материалов: керамики, кварца, стекла.

Рабочая вакуумная камера, в которой размещаются свариваемое изделие, нагреватели, механизм давления, выполняется обычно цилиндрической или прямоугольной формы из коррозионно-стойкой стали. Стенки водоохлаждаемые. Свариваемое изделие может располагаться на специальной опоре или в приспособлении. В большинстве случаев установка имеет одну камеру.

Для увеличения производительности могут предусматриваться несколько камер с целью получения непрерывной загрузки и выгрузки заготовок и изделий (камеры шлюзования). Необходимая сварочная сила создается гидравлическим устройством. Питание гидропривода производится от насосных масляных станций. В отдельных случаях сжатие заготовок обеспечивается специальными приспособлениями, принцип действия которых основан на различии коэффициентов линейного расширения материалов свариваемых заготовок и охватывающих их элементов приспособления. Такие приспособления позволяют вести сварку в серийно выпускаемых вакуумных печах. При диффузионной сварке детали помещают в камеру 6 (рис. 2.9), из которой вакуумными насосами 1 и 2 через маслоотражатель 3 и высоковакуумные затворы 5, 12 последовательно откачивается воздух. Детали 13 нагревают

нагревателем 4 и сдвигают через промежуточный шток 7 усилием P , создаваемым гидроцилиндром 8, который питается от насоса 9 и управляется клапаном 10. Масло забирается насосом из бака 11. Детали нагреваются введенным в камеру индуктором.

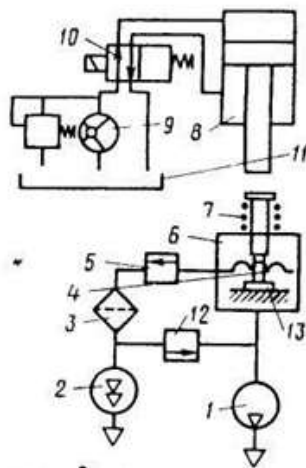


Рис. 2.9. Схема установки для диффузионной сварки с индукционным нагревом деталей

Установка диффузионной сварки УДС-2 (рис. 2.10 и табл. 2.2) предназначена для диффузионной сварки – пайки в вакууме деталей и узлов из различных материалов, в том числе из металлокерамики. Процесс сварки протекает за счет диффузионного соединения в условиях индукционного нагрева до температур порядка 70% температуры плавления наименее тугоплавкого материала с приложением давления, не вызывающего макропластическую деформацию деталей, в течение заданного промежутка времени.



Рис. 2.10. Установка для диффузионной сварки в вакууме УДС-2

В конструкцию установки входит трехслойный гидравлический пресс, рассчитанный на максимальное усилие 100 кН. Колонны пресса скреплены сверху траверсой, несущей на себе вакуумную камеру. Нижние концы колонн закреплены в литом чугунном основании, который служит одновременно корпусом привода перемещения дна камеры с гидроцилиндром, а также резервуаром для масла гидросистемы. На корпусе основания пресса с помощью кронштейна крепится гидравлический насос с электродвигателем.

Рабочая камера установки сварена из стали марки Х18Н9Т, снабжена смотровым окном для ввода индуктора ТВЧ и патрубком для присоединения к вакуумной системе. Камера имеет двойные стенки и охлаждается водой.

Дно камеры закреплено на подвижном чугунном корпусе с шестью направляющими втулками, скользящими по колоннам. Дно камеры охлаждается водой. В диске дна камеры имеется ввод для подключения термопары и охлаждаемый толкатель, который введен в дно через сильфонное уплотнение.

На плоскость толкателя камеры устанавливается пакет (приспособление) со свариваемыми деталями. Ниже дна камеры в центральной отверстии подвижной траверсы находится гидроцилиндр. Шток гидроцилиндра соединен с толкателем дна камеры. В средней части штока гидроцилиндра закреплен поршень с резиновыми манжетами, а нижняя часть служит плунжером.

Регулировка усилия сжатия пакета производится золотником, установленным в нижней крышке гидроцилиндра.

Вакуумная система установки состоит из ротационного форвакуумного насоса ВН-2МГ-1, паромаслянного насоса Н5С-М1, затвора ДУ16ОУ, трубопроводов и вакуумных электромагнитных кранов. Откачиваемые газы удаляются механическим насосом через резиновую трубку и патрубок.

Таблица 2.2. Технические характеристики установки для диффузионной сварки УДС-2

Параметры	Единицы измерения	Величина показателя
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ		
Потребная электрическая мощность	кВт	6
Питание установки	<i>В</i> <i>Гц</i>	220/380 от электрической трехфазной сети; 50
Нагрев деталей		Индукционный
ВОДОПРОВОДНАЯ СИСТЕМА		
Расход воды	<i>л/мин</i>	8-10
Давление воды	<i>атм</i>	2-3
СИСТЕМА ВАКУУМИРОВАНИЯ		
Давление вакуума в системе установки при повторных циклах работы	мм.рт.столба	$2 \cdot 10^{-4}$ - $5 \cdot 10^{-5}$
Откачка воздуха из камеры	-	Производится вакуумными насосами ВН-2МГ и Н5С-М1
МЕХАНИЧЕСКИЕ		
Характер действия машины	-	Автоматический
Ход верхнего электрода	мм	
Вид привода механизма сжатия	-	Гидравлический
Максимальное усилие сжатия	Н	100 кН
Регулирование усилия сжатия		С помощью золотника
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ		

Максимальная толщина свариваемых деталей при работе с асинхронным прерывателем	мм	2,5+2,5
ГАБАРИТНЫЕ РАЗМЕРЫ УСТАНОВКИ		
высота	мм	2110
ширина	мм	1000
длина	мм	1550
Масса машины	кг	1450
РАЗМЕРЫ РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ		
высота	мм	440
диаметр	мм	350
объем	литр	42

2.4. Преимущества и недостатки диффузионной сварки. Применение диффузионной сварки

Преимущества диффузионной сварки:

- высокое качество соединения, механические свойства материала в зоне сварки близки к свойствам основного материала;
- малое, а часто и полное отсутствие коробления конструкции вследствие отсутствия остаточных напряжений в сварных швах;
- исключение вакуумного отжига конструкции после сварки;
- улучшение условий труда сварщиков (отсутствие газовыделения и пыли).

Диффузионная сварка дает возможность избежать охрупчивания металла. С использованием промежуточных проставок можно также соединять материалы с резко отличающимися значениями коэффициентов термического расширения.

После диффузионной сварки не нужна механическая обработка сварного шва, получаемые изделия обладают высокой размерной точностью (остаточные деформации в пределах 0,1...6%); швы имеют высокие показатели механической прочности и пластичности на уровне основного материала.

Диффузионная сварка позволяет сваривать:

- большинство конструкционных материалов на металлической основе, ферриты, керамику, стекла, кварц, сапфир, графит, полупроводниковые материалы в однородном и разнородных сочетаниях;
- пористые, металлокерамические, композиционные материалы без нарушения их текстуры и ухудшения служебных свойств;
- материалы при использовании соответствующих барьерных покрытий и проставок;
- разнородные металлы и сплавы, склонные к образованию хрупких фаз, тугоплавкие металлы (вольфрам, ниобий, тантал и др.) при температурах ниже порога рекристаллизации.

К недостаткам метода следует отнести значительную длительность процесса, сложность оборудования, определенные трудности с загрузкой заготовок и выгрузкой готовых изделий из рабочей камеры при организации непрерывного процесса изготовления сварных изделий, требования достаточно вы-

сокой точности сборки и чистоты обработки свариваемых поверхностей, необходимость контроля температуры заготовки в зоне шва.

Недостатки диффузионной сварки:

- необходимость создания сложного оборудования типа вакуумных камер, камер с контролируемой атмосферой, что особенно дорого при больших габаритах изделий;

- длительность процесса сварки (общий цикл сварки с учетом времени вакуумирования, нагрева, выдержки, охлаждения составляет несколько часов);

- большая трудоемкость предварительной подгонки соединяемых деталей, особенно при сложной пространственной форме поверхностей сопряжения.

Процесс диффузионной сварки в вакууме применяют в тех случаях, когда другие способы сварки либо неприменимы, либо не обеспечивают должного качества сварных соединений. В наиболее полной мере достоинство диффузионной сварки проявляется при соединении разнородных материалов.

Широко применяется для сварки разнородных металлов, сплавов, например, стали с бронзой; титан с никелем; цинк с медью и др. Во многих случаях диффузионная сварка – единственный способ получения качественных сварных соединений, например, стекла с металлами графита со сталью, а также неметаллы (керамику, стекло).

Технологические возможности диффузионной сварки позволяют широко использовать этот процесс в приборостроительной и электронной промышленности при создании металлокерамических и катодных узлов, вакуумплотных соединений из разнородных материалов, полупроводниковых приборов, при производстве штампов и т.п.

Диффузионная сварка находит применение для изготовления крупногабаритных заготовок деталей сложной формы, получение которых механической обработкой, методами обработки давлением или литьем невозможно или неэкономично. Особенно эффективно такое применение диффузионной сварки в опытно-конструкторском и мелкосерийном производстве.

Перспективно получение многослойных пустотелых конструкций типа панелей из титановых или алюминиевых сплавов с наполнителем сложной формы (гофры, соты, ребра и др.) методом совмещения диффузионной сварки и формообразования в режиме сверхпластичности.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с конструкцией установки для диффузионной сварки УДС-2. Выбрать режим сварки образцов заданной марки материала и толщины.

2. Сварить образцы для испытаний соединений на срез на режимах, отличающихся от выбранного, изменяя величину сварочного тока, длительность процесса сварки или усилие сжатия деталей.

3. Испытать сварные образцы на срез на испытательной машине настольного использования Zwick Z50. Определить разрушающее усилие на точку, установить характер разрушения соединения. В отчете следует обобщить полученные данные.

4. Занести табличные и фактические данные в бланк отчета.
5. Выключить электрическое питание сварочной машины приборов, перекрыть трубопроводы воздуха и воды, убрать рабочее место.

Содержание отчета

1. Упрощенная схема установки для диффузионной сварки УДС-2.
2. Эскизы образцов для испытаний соединения на срез.
3. График зависимости разрушающего усилия от величины исследуемого параметра режима сварки.
4. Краткие выводы по работе, в которых необходимо отметить: влияние параметров режима сварки на прочность соединений, описать характер разрушения сварных соединений при испытаниях, сопоставить требуемую и фактическую прочность сварных соединений.

Контрольные вопросы

1. На чем основана диффузионная сварка?
2. Назовите технологические параметры процесса диффузионной сварки?
3. При каких температурах производится диффузионная сварка?
4. Какие технологические параметры зависят от глубины вакуума при диффузионной сварке?
5. От чего зависит время проведения диффузионной сварки?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Материаловедение и технология конструкционных материалов: учебник для вузов (УМО) / В.Б. Арзамасов, А.Н. Волчков, В.А. Головин [и др.]; под ред. В.Б. Арзамасова, А.А. Черепихина. 2-е изд., М., 2009. 448 с.
2. Технология и оборудование сварки плавлением; под ред. А.И. Акулова. М.: Машиностроение, 2003. 501 с.
3. Технология металлов и сварка: учебник для вузов / П.И. Полухин, Б.Г. Гринберг, В.Т. Жадан [и др.]; под ред. П.И. Полухина. М., ЭКОЛИТ. 2011. 464 с.
4. Чулошников П.Л. Контактная сварка: учеб. пособие для проф. обучения. М.: Машиностроение, 1987. 176 с.