

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Полоцкий государственный университет»

А. В. Дудан, С. Ф. Денисенко

СПЕЦИАЛЬНЫЕ СПОСОБЫ СВАРКИ, ПАЙКА

Учебно-методический комплекс
для студентов специальности 1-36 01 06
«Оборудование и технология сварочного производства»
и слушателей ИПК УО «ПГУ» специальности 1-36 01 72
«Оборудование и технология сварочного производства»

Новополоцк
ПГУ
2010

УДК 621.791 (075.8)
ББК 30.61я73
Д81

Рекомендовано к изданию методической комиссией
машиностроительного факультета в качестве
учебно-методического комплекса
(протокол № 8 от 07.05.2010)

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

зам. главного инженера «ОАО СРСУ-3 г. Новополоцк» А. А. ДАНИЛОВ;
канд. техн. наук, доц. каф. ТКМ УО «ПГУ» О. П. ШТЕМПЕЛЬ

Дудан, А. В.
Д81 Специальные способы сварки, пайка: учеб.-метод. комплекс для студ. специальности 1-36 01 06 «Оборудование и технология сварочного производства» и слушателей ИПК УО «ПГУ» специальности 1-36 01 72 «Оборудование и технология сварочного производства» / А. В. Дудан, С. Ф. Денисенко. – Новополоцк : ПГУ, 2010. – 280 с.
ISBN 978-985-531-107-3.

Приведены краткие сведения о специальных способах сварки металлов и пластмасс; изложены возможности, области применения и технологические особенности этих видов сварки, основные параметры, сведения об оборудовании. Включает конспект лекций, построенный по модульному принципу, и лабораторный практикум.

Предназначен для студентов специальности 1-36 01 06 «Оборудование и технология сварочного производства».

УДК 621.791 (075.8)
ББК 30.61я73

ISBN 978-985-531-107-3

© Дудан А. В., Денисенко С. Ф., 2010
© УО «Полоцкий государственный университет», 2010

ВВЕДЕНИЕ

Сварка – процесс получения неразъемных соединений посредством установления межатомных связей между соединяемыми частями деталей. Сваркой соединяют одно- и разнородные металлы и их сплавы, металлы с некоторыми неметаллическими материалами (керамикой, графитом, стеклом и др.), а также пластмассы. В зависимости от состояния металла в зоне соединения и использования внешних сил различают способы сварки плавлением и давлением.

Сварка плавлением осуществляется местным сплавлением соединяемых частей без приложения давления (виды сварки: дуговая, плазменная, электронно-лучевая, лазерная, электрошлаковая, газовая и др.).

Сварка давлением осуществляется за счет пластической деформации свариваемых частей при температуре ниже температуры плавления (виды сварки: холодная, контактная, ультразвуковая, диффузионная, трением, взрывом и др.).

Для образования соединений необходимо выполнение следующих условий: освобождение свариваемых поверхностей от загрязнений, оксидов и адсорбированных на них инородных атомов; энергетическая активация поверхностных атомов, облегчающая их взаимодействие; сближение свариваемых поверхностей на расстояния, сопоставимые с межатомным расстоянием в свариваемых заготовках.

Указанные условия реализуются различными способами сварки путем энергетического воздействия на материал в зоне сварки. Энергия вводится в виде теплоты, упругопластической деформации, электронного, ионного, электромагнитного и других видов воздействия.

УЧЕБНАЯ ПРОГРАММА

Факультет	<u> машиностроительный </u>		
Кафедра	<u> технология конструкционных материалов </u>		
Курс (курсы)	<u> 4 </u>		
Семестр (семестры)	<u> 8 </u>		
Лекции	<u> 64 </u>		
Лабораторные занятия	<u> 16 </u>		
Всего аудиторных часов по дисциплине	<u> 80 </u>	Экзамен	<u> 8 </u>
Всего часов по дисциплине	<u> 100 </u>	Форма получения высшего образования	<u> дневная </u>

1. ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

В настоящее время перед высшей школой стоит задача дальнейшего улучшения подготовки инженеров в ВУЗах как по общетехническим, так и по специальным дисциплинам на базе последних достижений науки и производства. В связи с этим в данную рабочую программу внесены последние достижения в области производства сварных конструкций как у нас в стране, так и за рубежом.

Дисциплина «Специальные способы сварки, пайка» призвана:

1. Показать студентам специальности 1-36 01 06 «Оборудование и технология сварочного производства» состояние сварочного производства в настоящее время и перспективы его развития на ближайшие 10 лет.
2. Обеспечить всестороннее изучение и освоение студентами теоретических основ и технологии специальных способов сварки, которые наиболее широко применяются в сварочном производстве.
3. Помочь студентам понять новейшие достижения современной сварочной науки и техники и правильно выбирать наиболее экономичные и прогрессивные способы сварки при составлении конструкторской и технологической документации.

Содержание курса построено с учетом тех знаний, которые студенты получили при изучении основных разделов предшествующих фундаментальных, общетехнических дисциплин и полного курса специальных дисциплин.

Цели и задачи дисциплины

Цель дисциплины:

- формирование целостного представления о методах и способах сварки как арсенале средств разнообразных технологических возможностей, имеющих единую природу, но использующих для решения задачи

создания необходимых условий для процесса сваривания различные физические, физико-химические эффекты и технические приемы, влияющие на возможность их применения в конкретных условиях на основе системного подхода к производству.

Задачами дисциплины является изучение:

- представлений о сварке, как результате актов топохимических реакций по всей соединяемой поверхности в определенных физических условиях;
- понимания положения специальных методов сварки и пайки в системе GALSS-технологий;
- формирование представлений о технологических возможностях и особенностях методов на основе специфики формирования условий сварки;
- использования системного подхода к выбору способа с учетом природы материала, характера конструкции, производственных условий (масштаба производства, влияния субъективного фактора, требований к стабильности качества, автоматизации производства и т. д.).

Знания, умения и навыки, получаемые после освоения дисциплины

Студент должен знать:

- физическую сущность, технологические схемы и технологические особенности и возможности рассматриваемых способов;
- технические средства для создания условий сварки;
- проблемы, возникающие при сварке разнородных материалов, ограничений допустимого термического воздействия на заготовки, при соединении разнотолщинных и ультратонких деталей и пути преодоления;
- пути управления текстурой и структурой материала в зоне соединения;
- специфику работы паяных соединений;
- особенности дефектов при сварке в твердой фазе и пайке.

Студент должен уметь:

- пользоваться диаграммами состояний для прогнозирования возможности поведения материала при сварке и пайке;
- выбирать способ получения неразъемного соединения с позиции минимального воздействия на основной материал;
- выбрать способ пайки, защитную среду, припой и оборудование.

Студент должен иметь навыки:

- разработки технологии получения неразъемного соединения с заданными свойствами;
- выбора оборудования для реализации сварки или пайки;

- проектирования участков цехов и размещения технологического оборудования;
- расчета себестоимости полученной продукции и ее конкурентоспособности.

Студент должен владеть профессиональными компетенциями:

- в производственно-технологической деятельности;
- в проектно-конструкторской и научно-исследовательской (экспериментальной) деятельности;
- в организационно-управленческой деятельности;
- в инновационной деятельности.

Объем дисциплины – 80 аудиторных часов.

Форма контроля – экзамен.

2. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

2.1. Лекционный курс

№ п/п	Название темы	Содержание	Объем в часах
РАЗДЕЛ 1. ХАРАКТЕРИСТИКА СПЕЦИАЛЬНЫХ СПОСОБОВ СВАРКИ И ПАЙКИ			
1	Введение в дисциплину	1. История развития специальных способов сварки 2. Использование сварки при современном уровне развития техники 3. Общие характеристики основных методов специальных способов сварки	2
2	Виды специальных способов сварки	1. Схема, характеризующая области сварки давлением и плавлением 2. Классификация видов сварки 3. Сварка в твердом состоянии	2
РАЗДЕЛ 2. СПЕЦИАЛЬНЫЕ СПОСОБЫ СВАРКИ ДАВЛЕНИЕМ			
3	Холодная сварка металлов	1. Сущность метода, схемы сварки, преимущества и недостатки 2. Характеристики применяемых материалов и оборудования 3. Промышленное применение холодной сварки	2
4	Контактная сварка и ее разновидности	1. Сущность контактного способа сварки и его разновидности 2. Контактная стыковая сварка 2.1. Контактная стыковая сварка сопротивлением 2.2. Контактная стыковая сварка оплавлением 3. Контактная точечная сварка	2

		4. Контактная шовная сварка 5. Оборудование для контактной сварки	
5	Сварка аккумуляторной энергией	1. Сущность, разновидности сварки аккумуляторной энергией 2. Конденсаторная сварка	2
6	Сварка металлов трением	1. Сущность сварки металлов трением, ее преимущества и недостатки 2. Характеристика теплового режима сварки 3. Подготовка деталей к сварке 4. Физико-механические свойства сварных соединений	2
		1. Приемы, применяемые при сварке тонкостенных труб и Т-образных соединений 2. Применяемое оборудование 3. Промышленное применение сварки трением	2
7	Ультразвуковая сварка	1. Сущность процесса сварки и ее разновидности 2. Теплофизические свойства сварных соединений	2
7	Ультразвуковая сварка	1. Области применения ультразвуковой сварки и применяемое оборудование 2. Преимущества ультразвуковой сварки	2
8	Сварка взрывом	1. Сущность процесса сварки взрывом 2. Физико-механические свойства соединений 3. Особенности процесса сварки взрывом 4. Подготовка изделий под сварку 5. Область применения сварки взрывом	2
9	Диффузионная сварка	1. Сущность метода диффузионной сварки 2. Преимущества метода диффузионной сварки	2
		1. Основные параметры и рекомендуемые режимы сварки 1.1. Подготовка поверхности перед сваркой 1.2. Температура и давление при сварке 1.3. Продолжительность сварки и охлаждения 1.4. Вакуумирование при сварке 1.5. Технология диффузионной сварки 2. Значение диффузионной сварки и области ее применения	2
10	Высокочастотная сварка	1. Сущность процесса 2. Преимущества применения высокочастотной сварки 3. Области применения высокочастотной сварки	2
РАЗДЕЛ 3. СПЕЦИАЛЬНЫЕ СПОСОБЫ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ			
11	Дуговая сварка в камерах с контролируемой атмосферой	1. Способы электродуговой сварки с защитой инертными газами 2. Электродуговая сварка в защитной атмосфере с использованием микрокамер 3. Электродуговая сварка в камерах с контролируемой атмосферой	2

12	Электронно-лучевая сварка	1. Сущность электронно-лучевой сварки 2. Основные физико-механические характеристики сварки	2
		1. Области применения электронно-лучевой сварки 2. Оборудование для электронно-лучевой сварки 2.1. Сварочная электронно-лучевая установка 2.2. Электронные сварочные пушки	2
13	Сварка световым лучом	1. Сущность лазерной сварки 2. Устройство и принцип работы оптического квантового генератора	2
		1. Области применения сварочной лазерной технологии 2. Сварка и пайка энергией лучей оптического диапазона	2
14	Плазменная сварка и обработка металлов	1. Характеристика плазменной струи и ее применение 2. Способы получения плазменных струй 3. Сварка плазменной дугой 4. Сварка микроплазменной дугой 5. Плазменно-дуговая сварка плавящимся электродом	2
15	Сварка и резка под водой	1. Подводная сварка 1.1. Сущность процесса сварки под водой 1.2. Применяемые материалы оборудование и приемы выполнения сварки под водой	2
		1. Подводная резка 1.1. Подводная электродуговая резка 1.2. Подводная электрокислородная резка 1.3. Особые способы резки металла под водой	2
16	Атомно-водородная сварка	1. Сущность процесса. 2. Виды сварных соединений и области применения атомно-водородной сварки. 3. Установки для атомно-водородной сварки	2
17	Термитная сварка	1. Сущность процесса термитной сварки, применяемые материалы и оборудование 2. Способы термитной сварки и области их применения	2
РАЗДЕЛ 4. НАНЕСЕНИЕ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ			
18	Наплавка металлов	1. Сущность и особенности наплавки металлов 2. Электродуговая наплавка 2.1. Дуговая наплавка покрытыми электродами 2.2. Дуговая наплавка под флюсом 2.3. Наплавка открытой дугой	2
		1. Электродуговая наплавка 1.1. Наплавка в среде углекислого газа 1.2. Наплавка в среде инертного газа 1.3. Вибродуговая наплавка	2
		1. Электрошлаковая наплавка 2. Плазменная наплавка 3. Наплавка намораживанием из расплава 4. Индукционная наплавка порошковой шихтой	2

		5. Способы газопламенной наплавки 5.1. Наплавка проволокой или прутком 5.2. Газопорошковая наплавка	
19	Электротермическое и газопламенное напыление	1. Способы электротермического напыления 1.1. Дуговая металлизация 1.2. Плазменное напыление 1.3. Подводное плазменное напыление покрытий 1.4. Электроимпульсное нанесение покрытий	2
19	Электротермическое и газопламенное напыление	1. Способы газопламенного напыления 1.1. Газопламенное нанесение покрытий 1.2. Детонационно-газовое напыление	2
РАЗДЕЛ 5. ПАЙКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ			
20	Пайка металлов и сплавов	1. Сущность процесса пайки 2. Методы применяемые при пайке изделий 3. Материалы для пайки	2
		1. Способы пайки 2. Общие технологические указания	2
РАЗДЕЛ 6. СВАРКА ПЛАСТМАСС			
21	Сварка пластмасс	1. Общие сведения о свариваемости пластмасс 2. Основные виды сварки пластмасс	2
		1. Способы сварки пластмасс 2. Классификация способов сварки пластмасс 3. Характеристики основных способов сварки пластмасс	2

Итого 64 ч.

2.2. Лабораторные занятия

№ п/п	Название темы	Содержание	Объем в часах
1	Холодная сварка металлов	Изучение физической сущности процесса и применяемых способов сварки. Ознакомление с работой типового оборудования. Приобретение практических навыков работы при выполнении технологического процесса холодной сварки. Выбор режимов сварки.	2
2	Лазерная сварка металлов	Изучение физической сущности лазерного излучения. Сущность лазерной обработки материалов. Ознакомление с типами лазерных излучателей. Выбор оптимальных режимов лазерной обработки.	2
3	Светолучевая сварка с использованием установки УСС-1.	Изучение физической сущности светолучевой сварки. Изучение устройства и принципы работы светолучевой установки УСС-1. Приобретение практических навыков работы на установке УСС-1.	2
4	Технологические особенности микроплазменной сварки и резки	Изучение устройства аппарата микроплазменной резки и сварки Multiplaz 2500. Приобретение практических навыков работы на установке. Выбор оптимальных режимов сварки и резки.	2

5	Газотермическая наплавка (напыление) различных типов деталей с использованием порошковых смесей	Изучение физической сущности газотермической наплавки (напыления). Ознакомление с устройством применяемого оборудования и его работой. Выбор оптимальных режимов наплавки (напыления).	2
6	Нанесение защитных покрытий электродуговой металлизацией с использованием проволочных электродов	Изучение физической сущности электродуговой металлизации с использованием проволочных электродов. Ознакомление с устройством и особенностями работы электродугового металлизатора ЭМ-14. Выбор режимов металлизации.	2
7	Изучение особенностей пайки электролизной газовой установкой типа «Лига»	Изучение технологических особенностей пайки, применяемых припоев устройства и принципа работы электролизной газовой установки «Лига-31». Выбор режимов высокотемпературной и низкотемпературной пайки.	2
8	Тепловая сварка пластмасс нагретым инструментом	Изучение физической сущности процесса, применяемых методов сварки, технологических возможностей способа. Ознакомление с устройством оборудования, подбор оптимальных режимов сварки. Анализ конструкции установки, выявление ее недостатков, пути их устранения. Выбор режимов сварки.	2

Итого 16 ч.

РАЗДЕЛ 1. ХАРАКТЕРИСТИКА СПЕЦИАЛЬНЫХ СПОСОБОВ СВАРКИ И ПАЙКИ

1. ВВЕДЕНИЕ В ДИСЦИПЛИНУ

1.1. История развития специальных способов сварки

Сварка является одним из ведущих технологических процессов изготовления и упрочнения деталей, изготовления строительных конструкций, трубопроводов и судов, ремонта деталей и конструкций. Эффективно использование технологических приемов сварки и при резке металлов.

Исторически сварка известна человечеству со времен использования, меди, серебра, золота и, особенно, железа, при получении которого выполнялась проковка, т. е. сваривание криц (кусочков технически чистого железа). Это и есть первый способ сварки – *кузнечная сварка металла*.

Наиболее распространена в производстве электродуговая сварка, являющаяся чисто российским изобретением. Впервые электрический дуговой разряд был выявлен петербургским профессором физики Петербургской медико-хирургической академии Василием Владимировичем Петровым в 1802 году, но только через 80 лет (1882 г.) российский инженер Николай Николаевич Бенардос, работая со свинцовыми аккумуляторными батареями, открыл способ сварки неплавящим угольным электродом. Он освоил технологию сварки свинцовых пластин. Далее он разработал способы сварки металла в среде защитного газа и электродуговой резки металла. Бенардос Н.Н. назвал свое изобретение «Электрогефест». По греческой мифологии Гефест – бог, покровитель кузнецов, поэтому в этом названии представлено новое – электричество и старое – первый известный способ сварки (кузнечная сварка). Через 6 лет в 1888 году инженер Николай Гаврилович Славянов разработал способ сварки плавящим электродом.

Дальнейшую работу Славянов Н.Г. и Бенардос Н.Н. выполняли вместе. Внедрение сварки в производство проходило очень интенсивно, так в России с 1890 по 1892 года было по их технологии отремонтировано с высоким качеством 1631 изделие общим весом свыше 17 тыс. пудов (в основном, чугунные и бронзовые детали). Они даже разработали проект ремонта российского памятника литейного производства «Царь-колокол», но работа не была разрешена.

Известный мостостроитель академик Евгений Оскарович Патон, предвидя огромное будущее электросварки в мостостроении и в других

отраслях хозяйства, резко сменил поле своей научной деятельности и в 1929 году организовал сначала лабораторию, а позднее, – первый в мире институт электросварки (г. Киев). Им было разработано и предложено много новых и эффективных технологических процессов электросварки. В годы войны в короткий срок под его руководством были разработаны технология и автоматические стенды для сварки под слоем флюса башен и корпусов танков, самоходных орудий, авиабомб.

Сварка – один из ведущих технологических процессов современной промышленности, от степени развития и совершенствования, которого во многом зависит уровень технологии в машиностроении, строительстве и ряде других отраслей народного хозяйства.

Современная сварочная наука и техника позволяют надежно соединять детали любых толщин и конфигураций – от деталей мельчайших электронных приборов до гигантских частей машин и сооружений.

Сварка открыла возможность коренного улучшения технологии производства всевозможных машин, приборов, строительных конструкций. Она способствует автоматизации и механизации работ при их изготовлении. Применение автоматов, полуавтоматов и машин, позволило освободить значительное количество рабочих для других нужд народного хозяйства.

1.2. Использование сварки при современном уровне развития техники

Современный уровень развития сварочной техники – прочная база для еще более широкого и эффективного использования сварки как мощного средства значительного повышения производительности труда, экономии металлов в промышленности, строительстве, сельском хозяйстве и транспорте, повышения качества и удешевления продукции.

Для еще более успешного развития сварочного производства необходимо ускорить создание совершенных систем автоматического управления сварочным оборудованием, основанных на применении программирования и кибернетики; автоматических и поточных линий; высокопроизводительных сварочных машин и вспомогательного оборудования.

В перспективных конструкциях новой техники находят широкое применение такие тугоплавкие и редкие металлы, как вольфрам, молибден, тантал, ниобий, цирконий и т. п., обладающие высокими жаростойкостью, жаропрочностью, сопротивлением коррозии и другими специфическими свойствами.

В ряде случаев эксплуатации при экстремальных температурных условиях, в чрезвычайно агрессивных средах, в потоках нейтронов высокой интенсивности и под воздействием других особых факторов даже эти металлы не могут удовлетворить требованиям, предъявляемым к изделиям условиями их работы. Вследствие этого создаются материалы, имеющие особые свойства. Кроме того, к широко применяемым материалам в ряде случаев начинают предъявлять повышенные требования в связи с использованием их в новых видах ответственных конструкций.

В связи с этим перед сварщиками возникают все новые и новые задачи разработки более совершенной технологии сварки широко применяемых и новых материалов, что требует или модернизации существующего оборудования и технологии, или разработки новых более совершенных методов сварки.

1.3. Общие характеристики основных методов специальных способов сварки

Использование в различных отраслях новой техники в качестве конструкционных материалов редких и тугоплавких металлов, которые ранее находили ограниченное применение, в основном лишь в качестве легирующих добавок, выдвинуло проблему разработки методов их сварки. Эти металлы составляют группу трудно сваривающихся, вследствие того, что, помимо высокой температуры плавления, они характеризуются высокой химической активностью при повышенных температурах. Большинство из них реагирует со всеми известными флюсами, а некоторые являются геттерами. Поэтому применительно к этим металлам оказались неприемлемыми такие методы сварки, как ручная дуговая сварка плавящимся электродом, сварка под флюсом и газовая.

Качественная сварка этих металлов в принципе может быть осуществлена при условии отсутствия продолжительного нагрева металла до высоких температур и обеспечения идеальной защиты металла от атмосферы с применением в ряде случаев больших скоростей процесса сварки.

Первые работы по аргонодуговой сварке редких и тугоплавких металлов показали, что этот метод с применением открытых горелок может быть ограниченно использован лишь при сварке тонкостенных изделий некоторых металлов, например тантала и ниобия, с обязательной газовой защитой нижней стороны шва. Получить необходимое качество сварки на цирконии и молибдене при использовании этого технологического процесса оказалось невозможным. Было очевидно, что защита инертным газом, подаваемым из горелки и даже при защите нижней стороны шва, не обеспечивает требуемых условий изоляции металла от воздуха.

В связи с тем, что активные металлы насыщаются газами не только в области сварочной ванны, но и в зонах, нагретых до значительно более низких температур, возникла необходимость защиты больших поверхностей свариваемого металла. Поэтому представлялось целесообразным провести усовершенствование метода дуговой сварки в инертных газах в целях использования его при сварке тугоплавких и активных металлов. При этом использовались подвижные кожухи, закрывающие горелку, место сварки и значительную зону нагреваемого металла. Применение защитных кожухов хотя и дало возможность несколько улучшить качество сварных соединений по сравнению со сваркой открытыми горелками, однако этот способ также не гарантировал отсутствие ухудшения физико-химических свойств металла сварных соединений.

Улучшение условий изоляции от атмосферы достигается путем использования герметичных камер с атмосферой из инертного газа, состав которого в очень малой степени может отличаться от состава газа в баллоне. Наличие герметичной камеры исключает попадание в нее воздуха. Однако процесс сварки в камерах с контролируемой атмосферой также далек от обеспечения идеальной защитной среды вследствие того, что в промышленных инертных газах всегда присутствует некоторое количество азота, кислорода и водяных паров.

Дальнейшее улучшение качества металла шва при сварке в инертном газе могло быть получено лишь путем использования химически чистых инертных газов. Однако получение таких газов представляет значительные трудности. Эти газы практически в промышленном масштабе не производятся.

Таким образом, совершенствование существующих методов сварки не решает проблемы сварки конструкций из тугоплавких и активных металлов и неметаллических материалов.

Основным недостатком дуговых методов сварки является относительно небольшая концентрация энергии в источнике теплоты и несовершенство защиты металла от действия кислорода и азота воздуха. Вследствие этого время действия высоких температур на металл сварного соединения оказывается чрезвычайно длительным. Длительное воздействие высоких температур на металл сварного соединения при его недостаточной защите приводит к ряду нежелательных явлений: потере пластичности и антикоррозионных свойств, значительным размерам шва, и вследствие этого большим затратам энергии и большим остаточным деформациям, насыщению металла шва газами и др. Эти недостатки, в значительной степени, могут быть устранены

путем использования для сварки источников теплоты с высокой концентрацией энергии в сочетании с совершенной защитой.

В последнее время в сварочной технике находят применение источники теплоты, концентрация энергии в которых на 2 – 3 порядка выше, чем у старых источников. К высококонцентрированным источникам относятся: электронный луч, когерентный световой луч, токи высокой частоты.

Разработаны методы сварки с использованием в качестве защиты вакуума: электроннолучевая, диффузионная, дуговая и др.

Использование вакуума в качестве защиты при сварке дает возможность надежно защитить расплавленный металл при сварке активных и тугоплавких металлов и получить высокое качество металла шва.

Электроннолучевая сварка позволяет благодаря большой концентрации энергии проплавливать толстый металл очень узким «кинжальным» швом. При небольшом расходе электроэнергии, в десятки раз меньше, чем при дуговых методах сварки, удается сваривать стали и сплавы толщиной более 100 мм. Этот метод дает возможность осуществлять сварку и неметаллических материалов.

В промышленности используются квантовые генераторы – лазеры, дающие сверхмощные пучки световой энергии, открывающие новые возможности соединения материалов.

Диффузионная сварка в вакууме позволяет сваривать материалы с образованием ряда новых видов соединений, недоступных для обычных способов сварки.

Процесс образования сварного соединения ранее, обычно, связывали с нагревом металла до высоких температур. Современные представления о природе металлических межатомных связей показывают возможность использования этого «механизма» для соединения металлов в твердом состоянии.

В последние годы появилось несколько методов сварки металлов без их расплавления, основанных на эффекте образования металлических связей на ювенильных поверхностях с использованием пластических деформаций металла (холодная, ультразвуковая, трением, взрывом и диффузионная). Перечисленные методы сварки объединяет общность физических процессов возникновения металлических связей между соединяемыми поверхностями. В этих процессах образование металлических связей происходит в твердом состоянии металла в результате совместной пластической деформации. Методы сварки в твердом состоянии различаются способами, которыми осуществляется пластическая деформация, величиной пластической деформации и температурным режимом.

Сварка в твердом состоянии значительно расширяет область применения сварки, позволяя соединять между собой разнородные металлы,

сварка плавлением которых была невозможна, соединять неметаллические материалы с металлами и т. п.

Новые способы позволяют осуществить так называемую *прецизионную сварку*, т. е. получить конструкции с заданными расчетными размерами. Это, в свою очередь, открывает неограниченные возможности для автоматизации сварочного производства, создания самого совершенного сварочного оборудования с программным управлением. В сварных конструкциях будущего будут использоваться металлические и неметаллические детали законченных форм и размеров. Сварная конструкция будет свободна от внутренних напряжений, не будет нуждаться ни в термической, ни в механической обработке.

В промышленности, строительстве и сельском хозяйстве все более широкое применение находят полимерные материалы. Использование этих материалов снижает вес изделий, габаритные размеры, эксплуатационные расходы и повышает производительность труда. В связи с широким использованием полимеров в качестве конструкционных материалов возникла проблема их соединения. В промышленности используется несколько методов сварки полимеров: теплоносителями, ультразвуком, инфракрасным излучением и др. Предстоит дальнейшая работа по совершенствованию методов сварки полимеров и пластмасс.

Уже сейчас широкое применение сварка находит при изготовлении космических кораблей и ракетных двигателей, а в перспективе предстоит широкое использование сварки при освоении космоса. Сварка будет использоваться при строительстве космических станций на околоземных орбитах, при изготовлении и сборке космических кораблей за пределами земной атмосферы, при строительстве стартовых площадок и взлетных устройств на других планетах, при освоении других миров.

Преимущества использования сварки перед заклепочными и резьбовыми соединениями деталей при изготовлении различных конструкций следующие:

- рациональность конструкций;
- экономия металла (до 15... 20 %);
- более высокая производительность (на 15... 20 %).;
- более низкая себестоимость (снижение на 20... 45 %);
- высокая надежность соединения.

Контрольные вопросы

1. Что такое сварка? Где применяется сварка?
2. Историю развития сварки. Назовите первый способ сварки.

3. Где и для чего используется сварка при современном уровне развития техники?

4. Назовите общие характеристики основных методов специальных способов сварки.

5. Почему возникла необходимость создания специальных способов сварки?

6. Приведите преимущества сварки перед заклепочными и резьбовыми соединениями.

2. ВИДЫ СПЕЦИАЛЬНЫХ СПОСОБОВ СВАРКИ

2.1. Схема, характеризующая области сварки давлением и плавлением

Сваркой называется процесс получения неразъемного соединения деталей местным сплавлением или пластической деформацией. Наплавка – это разновидность сварки, заключающаяся в том, что на поверхность детали наносят слой металла, предназначенный для восстановления размеров изношенной детали или для повышения её износостойкости.

При восстановлении деталей сваркой и наплавкой можно получать долговечность их сопоставимой или даже более высокой с долговечностью новых деталей, использовать механизацию и автоматизацию процессов.

Сварка происходит при молекулярном или атомном взаимодействии металлов (рис. 2.1), для чего необходимо расплавление или пластическая деформация деталей.

Расплавление металла происходит при температурах выше $T_{пл}$. При сварке плавлением расплавленный металл образует сварочную ванну, при кристаллизации которой происходит соединение поверхностей.

При пластическом деформировании как предварительно нагретых, так и холодных металлов разрушаются окисные пленки и поверхности сближаются до расстояний возникновения межатомных связей, и поэтому происходит прочное соединение деталей. Из рис. 2.1. видно, что при увеличении температуры нагрева металла требуются меньшие усилия для сварки давлением.

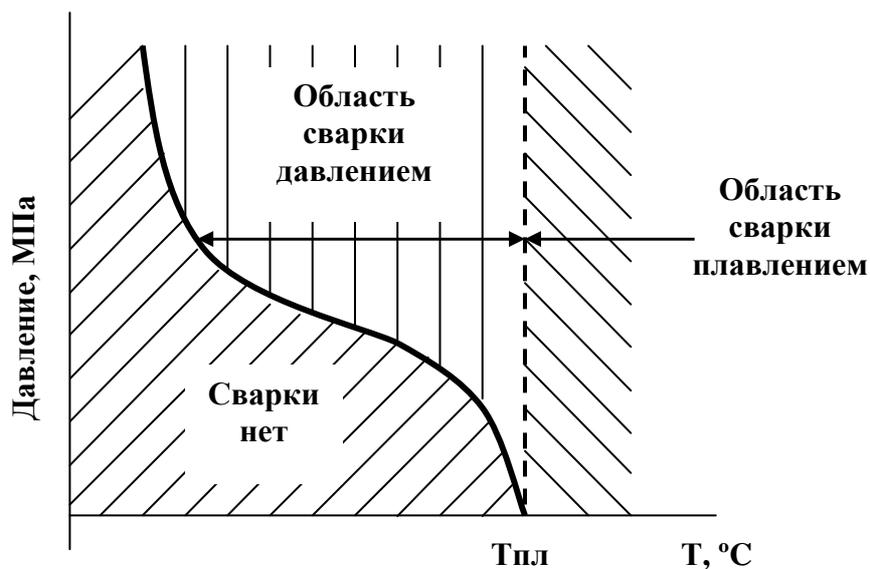


Рис. 2.1. Схемы возможных областей сварки (давлением и плавлением) в зависимости от температуры (T) и давления (P), реализуемых в процессе сварки

2.2. Классификация видов сварки

В настоящее время известны сотни различных способов сварки в зависимости от вида энергии, особенностей технологического процесса, защиты от воздуха и др. Самая приближенная классификация видов сварки представлена на рис. 2.2.

Расплавление металла может происходить за счет:

- энергии дуги при электродуговой сварке;
- электрического тока проходящего через расплавленный флюс при электрошлаковой сварке;
- бомбардировки в вакууме свариваемых поверхностей электронами;
- энергии от горения газов при газовой сварке;
- энергии от горения порошковой смеси при термитной сварке;
- расплавлением кромок деталей перегретым расплавленным присадочным металлом при литейной сварке.

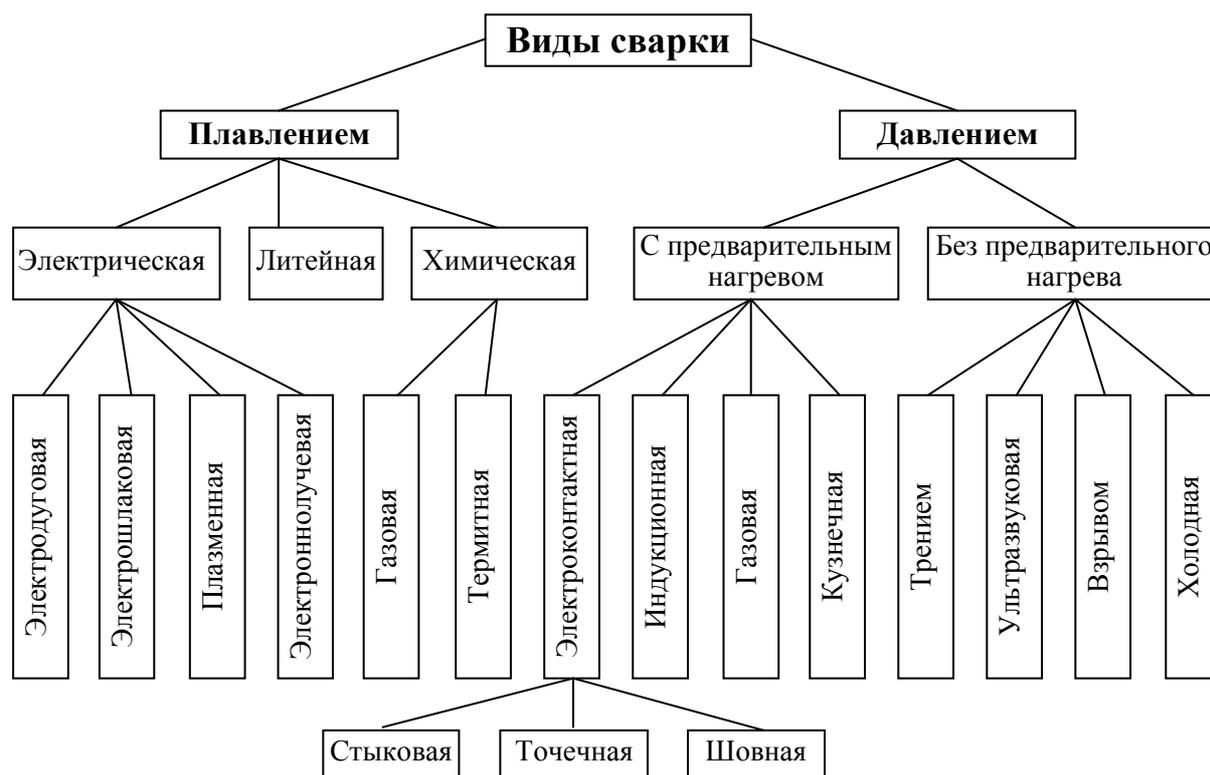


Рис. 2.2. Классификация видов сварки

2.3. Сварка в твердом состоянии

В последнее время показано, что металлы можно сваривать и при комнатных температурах без нагрева металла до высоких температур. Соединение металлов происходит в твердом состоянии вследствие образования металлических связей на свариваемых поверхностях при их совместном деформировании.

Сварка в твердом состоянии – это ряд сварочных процессов, при температурах существенно ниже точек плавления основного металла, без добавления присадочного металла или пайки твердого припоя. Давление к соединению может, как прикладываться, так и нет. Например, холодная сварка, диффузионная сварка, кузнечная сварка, горячая сварка под давлением и сварка прокаткой.

Для идеального случая процесс образования металлического соединения при холодной сварке можно представить следующим образом. Предположим, что имеются два куска металла с абсолютно гладкими и чистыми поверхностями. Так как металлы представляют собой конгломерат из положительно заряженных ионов и электронов, то взаимодействие между облаками электронов и ионами, находящимися в узлах кристаллической решетки, определяет моно-

литность и прочность кусков металла. При сближении двух металлических поверхностей происходит коллективизация электронов, вылетающих из поверхностей, в результате чего возникают силы взаимодействия между поверхностями. При достаточном сближении двух кусков металла образуется общее электронное облако и, следовательно, единый агрегат.

Из приведенных выше рассуждений следует, что при сближении идеально гладких и идеально чистых поверхностей между ними самопроизвольно возникают межатомные силы взаимодействия, т. е. происходит образование прочного соединения.

Однако строение реальной металлической поверхности весьма сложно и в значительной степени отличается от идеальной – ювенильной поверхности. Геометрия реальной металлической поверхности определяется ее волнистостью и шероховатостью. **Волнистость** характеризует геометрию поверхности в макроскопическом, а **шероховатость** – в микроскопическом масштабе. Нужно также отличать ультрамикронеровности. Геометрию поверхности можно представить в виде двух кривых: кривой волны (рис. 2.3, а) и частотной кривой шероховатостей (рис. 2.3, б), которые накладываются на кривую волны.



Рис. 2.3. Профилограмма волнистой и шероховатой поверхности:
а) – кривая волны поверхности; б) – частотная кривая шероховатости

Шероховатости могут быть очень разнообразны по высоте микроступов и расстоянию между их вершинами. Вследствие наличия главным образом микронеровностей действительная площадь поверхностей металла во много раз превышает площадь, замеренную обычными методами. В верхних слоях металла сосредоточена значительная поверхностная энергия, обусловленная наличием нескомпенсированных металлических связей, дислокаций, вакансий, что в совокупности с развитой поверхностью в микро- и ультрамикронеровностях вызывает активное взаимодействие атомов металла, расположенных на поверхности, с внешней средой.

Над металлической поверхностью существует облако непрерывно движущихся свободных электронов, покидающих металл и снова возвра-

щающихся в него. Благодаря этому процессу поверхность металла покрыта двойным электрическим слоем: минус – облако электронов и плюс – дырки верхних слоев металла (за счет покинувших металл свободных электронов). Плотность электрического заряда двойного электрического слоя непостоянна по всей поверхности и зависит от её микрогеометрии. Наибольший потенциал концентрируется на остриях микровыступов. Поэтому микровыступы – наиболее активные участки поверхности.

Вследствие высокой активности поверхностных слоев металла она всегда покрыта окислами, жидкими и газовыми пленками. Идеально чистая (ювенильная) металлическая поверхность, свободная от окисных пленок и адсорбированных слоев жидкостных и газовых молекул, может быть создана только в очень глубоком вакууме.

Вакуум 10 – 9 мм рт. ст. не предохраняет поверхности металла от возникновения на них слоев из молекул газа. Ювенильная металлическая поверхность может существовать очень короткие моменты времени в изломе металла при совместном деформировании двух частей металла в местах их соприкосновения или после его механической обработки. После механической зачистки поверхности металла в атмосфере сухого воздуха на ней образуется оксидная пленка (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Толщина окисной пленки

Металл	Толщина пленки, см	Время образования пленки, с
Алюминий	$12 \cdot 10^{-8}$	15
Медь	$3 \cdot 10^{-7}$	30
Железо	$2 \cdot 10^{-7}$	40
Молибден	$(2 \div 3) \cdot 10^{-7}$	40
Германий	$(2 \div 3) \cdot 10^{-7}$	80

На воздухе микровыступы и впадины поверхности многих металлов, кроме так называемых благородных (золото, платина и др.), мгновенно покрываются пленками окислов, а также слоями адсорбированных молекул газов, воды и жировых веществ. Толщина и последовательность расположения таких пленок может быть различной. Однако непосредственно на поверхности металла обычно находится пленка окислов (рис. 2.4, слой А).

Слой окислов сохраняет на границе с металлом отрицательный потенциал против положительного потенциала самого металла. Наружная поверхность слоя окислов имеет положительный потенциал, и они адсорбируют кислород, имеющий отрицательный потенциал. Таким образом, поверхность металла (рис. 2.4) покрывается двумя двойными электрическими слоями. Окисные пленки обычно очень хрупкие и обладают высокой твердостью.

Кроме пленки окислов, поверхность металлов покрыта газовыми молекулами, жировыми пленками и парами воды (рис. 2.4, слой Б). Толщина этих пленок различна. Например, толщина пленки паров воды составляет 50 – 100 молекул. Жировые слои имеют большую толщину. Полностью удалить масляные пленки с металла практически невозможно никакими растворителями, поскольку адсорбционная связь жировых молекул и металла представляет собой чисто электрическую связь. Полярные жировые молекулы образуют с металлом двойной электрический слой, что и обеспечивает весьма прочную связь металла и пленки одномолекулярной толщины. После промывки металла бензином слой органических молекул составляет 1 – 5 мкм, и только при особо тщательной обработке растворителями сохраняется жировая пленка толщиной 10 – 100 молекулярных слоев.

Сложное строение реальной металлической поверхности существенно меняет картину взаимодействия поверхностей при их сближении.

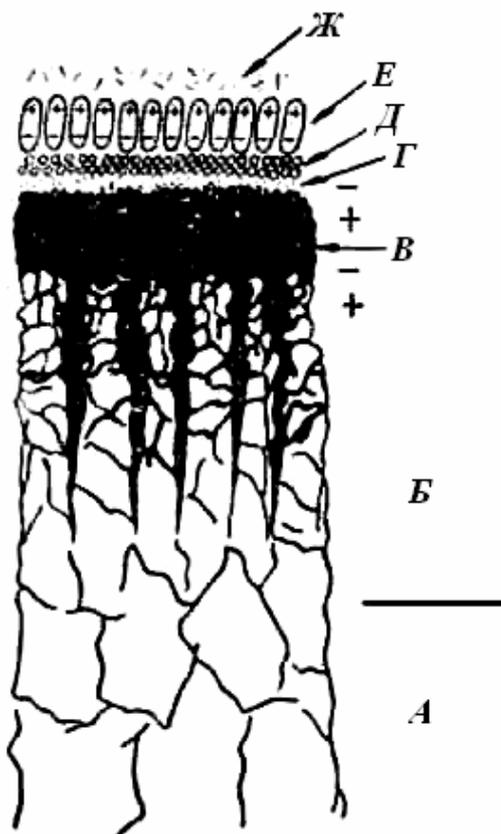


Рис. 2.4. Строение поверхности металла в воздушной атмосфере:

- A* — глубинный слой металла, не затронутый пластическими деформациями;
- B* — поверхностный слой полностью разориентированных кристаллитов с прослойкам окислов;
- B* — окисный слой, характерная полярность внутренних и внешних границ, а также полярность верхних слоев металла показаны знаками «+» и «-»;
- G* — адсорбированный слой кислородных анионов и нейтральных молекул воздуха;
- D* — слой водяных молекул;
- E* — слой жировых молекул;
- Ж* — ионизированные пылевые частицы

Образование прочного сварного соединения реальных металлов при сварке в твердой фазе совместным деформированием происходит в три условных этапа:

- 1) сближение свариваемых поверхностей;
- 2) возникновение металлического контакта;
- 3) создание прочного сварного соединения.

Первый этап – *сближение свариваемых поверхностей* – характеризуется деформацией как микрошероховатостей, так и волнистостей. При сближении поверхностей с неровностями вначале возникает контакт в отдельных наиболее высоких точках. Для получения контакта по большей поверхности необходимо деформирование уже соприкасающихся участков. Чем больше должна быть площадь соприкосновения на поверхности сжимаемых металлов, тем, очевидно, больше нужно деформировать неровности, вступившие в контакт, и тем большей должна быть сжимающая сила.

Фактором, затрудняющим сварку реальных металлов, являются окисные пленки, пленки жидкостей, газов и различного рода органических и иных загрязнений. Вследствие высокой относительной твердости окисных пленок образование между ними контакта значительной площади потребовало бы очень больших усилий. Соединение может возникнуть между окисными пленками, но из-за их высокой хрупкости оно обладает плохими прочностными свойствами – малой пластичностью, низким сопротивлением ударным нагрузкам и т. п. – и обычно легко разрушается. Поэтому для получения прочных соединений окисные пленки должны быть удалены из места сварки.

Еще более нежелательное влияние оказывают загрязняющие поверхность органические пленки (масла). Органические пленки достаточной толщины предотвращают возможность сварки контактирующих металлов и поэтому они также должны быть предварительно удалены со свариваемых поверхностей. Однако в зависимости от толщины слоев окислов и адсорбционных пленок в процессе сближения металлические связи могут создаваться на немногих микроскопических островках.

Второй этап начинается в процессе сближения и деформирования поверхностных слоев и неровностей. Этот этап характеризуется увеличением площади металлического контакта свариваемых поверхностей и возникновением общих кристаллов на них. В начале формирования металлического контакта кристаллиты разделены пленками сложного состава. При деформировании сжатые свариваемые поверхности не контактируют с атмосферой, поэтому новых пленок не образуется, а имеющиеся хрупкие окисные пленки вследствие увеличения площади контакта разрушаются, жидкие и газовые пленки

вытесняются и частично диффундируют в глубь металла, в результате ювенильные поверхности приходят в непосредственное соприкосновение.

В контактах двух металлических поверхностей действие межатомных сил притяжения начинается на расстояниях $4\div 5 \cdot 10^{-8}$ см. При достижении таких расстояний уже возможно образование металлических связей, т. е. возможен процесс, который мы называем сваркой. Таким образом, только при значительном сближении, разрушении и удалении поверхностных пленок границы раздела становятся сходными по структуре и природе с межкристаллитными прослойками.

Третий этап характеризуется различного рода перемещениями на определенные расстояния относительно больших масс частиц вследствие диффузии. Этот процесс требует значительного времени.

Рассмотренные этапы образования сварного соединения относятся, главным образом, к таким процессам сварки в твердой фазе, при которых можно выделить этапы сближения, образования физического контакта и создания прочного сварного соединения. Очевидно, это имеет отношение к холодной и диффузионной сварке и сварке трением.

Процесс сварки при действии импульсных давлений – сварка взрывом, электромагнитным импульсом, ультразвуковая – будет проходить в те же три этапа, однако отличия состоят в том, что отдельные этапы в этих методах сварки трудно различимы вследствие малого времени образования сварного соединения.

Контрольные вопросы

1. Приведите схему возможных областей сварки и охарактеризуйте ее.
2. Что такое сварка давлением и сварка плавлением, в чем их отличия?
3. Приведите классификацию видов сварки.
4. Что такое сварка в твердом состоянии?
5. Дайте характеристику факторам, влияющим на процесс сварки в твердом состоянии.
6. Какое строение металла в воздушной атмосфере?
7. Почему поверхностные слои металлов всегда покрыты окислами, жидкими и газовыми пленками?
8. Приведите три условных этапа образования сварного соединения в твердой фазе и дайте характеристику каждому из них.

РАЗДЕЛ 2. СПЕЦИАЛЬНЫЕ СПОСОБЫ СВАРКИ ДАВЛЕНИЕМ

3. ХОЛОДНАЯ СВАРКА МЕТАЛЛОВ

3.1. Сущность метода, схемы сварки, преимущества и недостатки

Холодная сварка – это метод сварки в твердом состоянии, при котором давление прикладывается при комнатной температуре и соединение производится с существенной деформацией.

Холодную сварку выполняют без нагрева при обычных и даже пониженных температурах. Для осуществления холодной сварки необходимо удалить со свариваемых поверхностей окислы и загрязнения и сблизить соединяемые поверхности на расстояние параметра кристаллической решетки; на практике создают значительные пластические деформации.

Холодной сваркой можно получать соединения встык, внахлестку и в тавр. Перед сваркой поверхности, подлежащие сварке, очищают от загрязнений обезжириванием, обработкой вращающейся проволочной щеткой, шабрением. При сварке встык проволоки только обрезают торцы.

Листы толщиной 0,2 – 15 мм сваривают внахлестку путем вдавливания в толщу металла с одной или с двух сторон пуансонов (рис. 3.1). Соединения выполняют в виде отдельных точек или непрерывного шва. Ширину или диаметр пуансона выбирают в зависимости от толщины δ свариваемого материала: $r = (1 \div 3)\delta$.

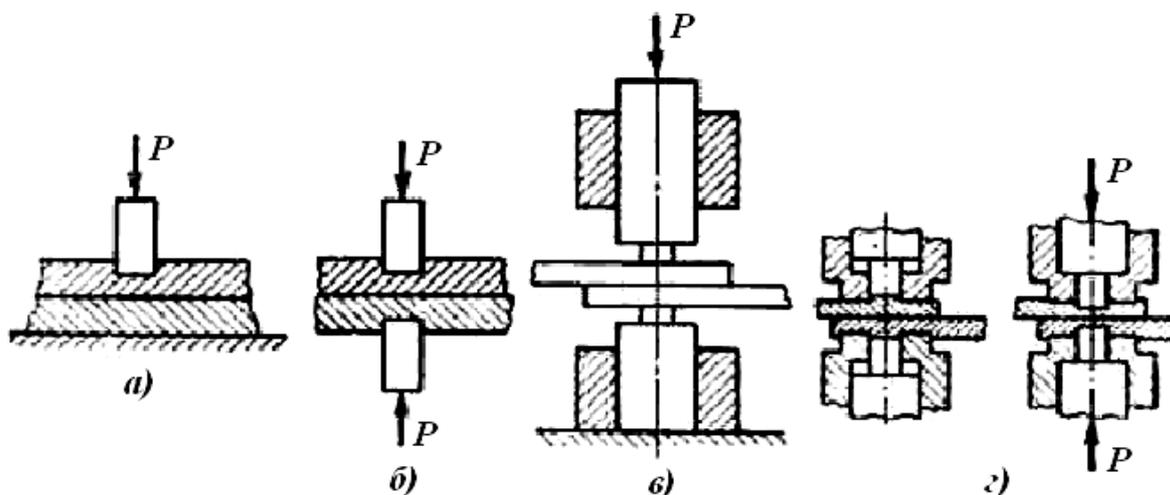


Рис. 3.1. Схемы холодной сварки внахлестку: *а* – вдавливанием одного пуансона; *б* – вдавливанием двух пуансонов; *в* – вдавливанием пуансонов с заплечиками; *г* – вдавливанием пуансонов с предварительным зажатием изделия

Основной параметр, определяющий процесс холодной сварки – величина деформации металла в месте соединения, которая зависит от свойств металла (табл. 3.1), его толщины, типа соединения и способов подготовки поверхностей.

Таблица 3.1

Зависимость деформации от свойств металла

Металл	Относительная глубина вдавливания пуансона, %	Металл	Относительная глубина вдавливания пуансона, %
Индий	10-15	Серебро	82-86
Алюминий	55-60	Олово	85-88
Титан	70-75	Никель	85-90
Алюминиевые сплавы	75-80	Медь	85-90
Свинец	80-85	Армо-железо	85-92

Зависимость прочности точечных соединений от величины деформаций для различных металлов представлена на рис. 3.2. Снижение прочности точки после достижения определенного максимума объясняется уменьшением толщины металла в месте сварки, вследствие чего происходит разрушение с вырывом точки, а не срез, как это происходило до максимума.

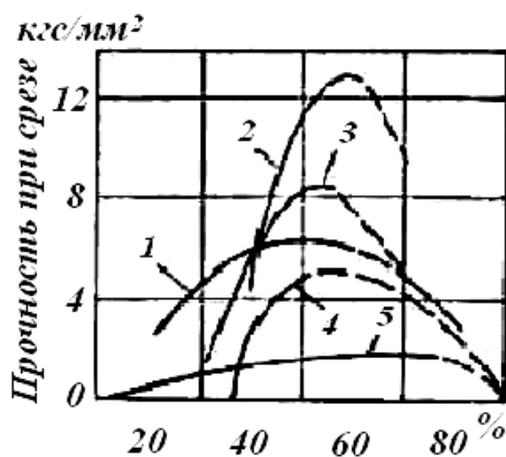


Рис. 3.2. Зависимость прочности точечных соединений от величины деформации:

- 1 – наклепанный алюминий; 2 – медь электролитическая; 3 – тантал;
4 – мягкий алюминий; 5 – олово

Степень необходимой деформации при сварке разнородных металлов определяется свойствами того из свариваемых металлов, при сварке которого требуется меньшая деформация. Этим пользуются при сварке малопластичных металлов, применяя прокладки из пластичных металлов.

Герметичное шовное соединение может быть достигнуто вдавливанием пуансона по всей длине шва или путем прокатывания ролика (рис. 3.3).

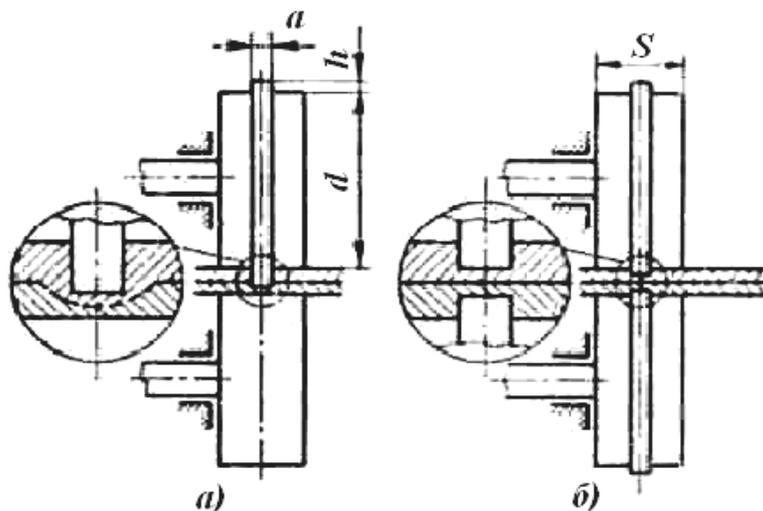


Рис. 3.3. Схема холодной шовной сварки с односторонним (а) и двусторонним деформированием (б)

Стержни, полосы, профили и провода соединяют встык путем сдавливания свариваемых элементов друг с другом. Встык можно сваривать пластичные металлы: медь, алюминий, свинец, олово, кадмий, никель, титан, алюминиевые сплавы.

Прочность соединения зависит от величины пластической деформации в месте его образования. Величина пластической деформации зависит от длины выпущенного из зажимов конца свариваемого стержня, который затем полностью выдавливается из зоны стыка в процессе сварки.

Прочность стыковых соединений обычно выше прочности основного металла. Это объясняется тем, что в местах соединения металл упрочняется вследствие наклепа. Механические свойства соединений можно изменять с помощью термообработки. После термообработки прочность стыкового соединения равна прочности отожженного металла.

Скорость приложения давления в процессе сварки практически не влияет на прочность соединения, поэтому производительность холодной сварки может быть высокой.

Холодную сварку можно осуществлять путем сдавливания соединяемых изделий с одновременным их тангенциальным относительным смещением. Этот способ сварки получил название *сварки сдвигом*.

При сварке сдвигом механизм образования сварного соединения иной.

Ранее было показано, что когда приложена нормальная нагрузка, то деформируются только неровности, следовательно, площадь контакта, свободная от загрязнений и окисных пленок, мала. При приложении тангенциальной силы начинается перемещение поверхностей, в процессе чего

окисные пленки и загрязнения сдираются и образуются отдельные мостики контакта. Тангенциальное смещение соединяемых изделий дает возможность получить сравнительно большие площади очищенных от пленок поверхностей при небольшом растекании каждой из них. Наличие тангенциальной силы уменьшает сопротивление металла пластическим деформациям и при данной нормальной силе позволяет получить большую площадь контакта. Это ведет к тому, что при точечной сварке сдвигом схватывание происходит при малых деформациях и усилиях.

При сварке сдвигом разноименных металлов прочное соединение возникнет только у металлов с близкими механическими свойствами, например наклепанного алюминия и отожженной меди, и некоторых других.

К **преимуществам** этого способа относятся:

- малый расход энергии;
- незначительное изменение свойств металла в зоне сварного соединения;
- высокая производительность;
- возможность автоматизации.

К **недостаткам** способа следует отнести:

- относительно ограниченное количество сплавов, обладающих необходимой пластичностью ($\delta > 30\%$);
- снижение несущей способности сварных соединений из-за глубоких вмятин на поверхности, оставляемых пуансонами.

3.2. Характеристики применяемых материалов и оборудования

Для шовной сварки алюминия рекомендуется применять ролики следующих размеров: диаметр $d = 50\delta$, ширина рабочего выступа $a = (1 \div 1,5)\delta$, высота рабочего выступа $h = (0,8 \div 0,9)\delta$, ширина опорной части $S = (2 \div 4,5)\delta$, где δ – толщина свариваемого материала.

Длина вылета стержня при сварке составляет для алюминия $(1 \div 1,2)d$, для меди $(1,25 \div 1,5)d$, где d – диаметр стержня. При сварке алюминия с медью вылет медного стержня должен быть на 30 – 40 % больше, чем алюминиевого. Давление при холодной сварке встык составляет для алюминия 70 – 80 кгс/мм² (686 – 784 МН/м²), меди 200 – 250 кгс/мм² (1960 – 2450 МН/м²), меди с алюминием 150 – 200 кгс/мм² (1470 – 1960 МН/м²). Усилие зажатия образцов в зажимах с насечкой должно превышать усилие осадки при сварке алюминия более чем на 50 %, а при сварке меди – более чем на 80 %.

Для соединения холодной точечной сваркой могут быть использованы любые прессы (винтовые, гидравлические, рычажные, эксцентриковые).

Для одновременной сварки нескольких точек требуются прессы усилием 50 – 100 тс (490 – 980 кН). Для одноточечной сварки широко используют гидропрессы РПГ-7 и гидропрессы с педальным приводом, создающие усилие до 12 тс (117,6 кН).

Для точечной сварки алюминиевых шин толщиной 5 + 5 мм в монтажных условиях предназначена установка УГХС-5, разработанная во ВНИИЭСО (Научно-исследовательский институт электросварки). Для армирования выводов алюминиевых обмоток, шин и других деталей медными накладками, используют машину МХСА-50. Полуавтомат МХСК-4 предназначен для герметичной сварки алюминиевых корпусов конденсаторов с крышкой; производительность сварки 750 изделий в час. Машина МСХС-60 предназначена для стыковой сварки алюминиевых стержней сечением до 700 мм², медных – до 250 мм² и медных с алюминиевыми – до 300 мм². Максимальное осадочное усилие машины 60 тс (588 кН), максимальное усилие зажатия 90 тс (882 кН).

Машину МСХС-30 (рис. 3.4) применяют для сварки встык медных троллейных проводов сечением до 100 мм². Машина может быть использована для сварки алюминия, а также меди с алюминием сечением до 200 мм². Она потребляет 1 кВт электроэнергии, развивает усилие осадки до 30 тс (294 кН) и позволяет сваривать до 300 стыков в смену.

Для стыковой сварки алюминиевых одножильных проводов сечением до 10 мм² применяют ручные клещи (рис. 3.5).

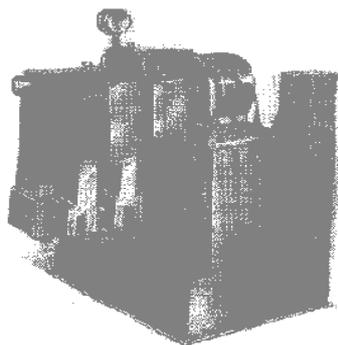


Рис. 3.4. Машина для холодной сварки МСХС-30

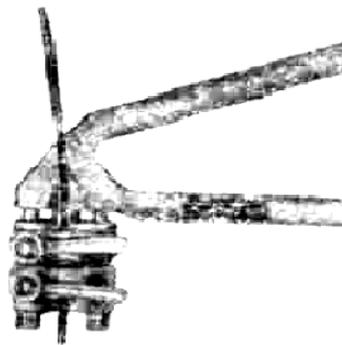


Рис. 3.5. Ручные клещи для холодной стыковой сварки проводов типа КС-6

3.3. Промышленное применение холодной сварки

Холодная сварка применяется в промышленности для заварки алюминиевой оболочки кабелей, при сварке корпусов полупроводниковых приборов, при изготовлении бытовых приборов из алюминия – чайников,

подставок, различного рода каркасов. Также холодная сварка нашла применение в электромонтажном производстве для сварки проводов и шин внахлестку и встык при монтаже электролизных ванн, сетей связи и троллейных проводов и электропроводки в домах.

Холодная сварка нашла применение при изготовлении теплообменников для холодильников, технология изготовления которых состоит в следующем. На поверхность листов из алюминиевого сплава специальной краской закрашивают места, в которых сварки не должно быть. После чего листы совместно прокатывают. В результате деформаций, возникающих при прокатке, происходит сварка по всей поверхности листов, за исключением покрашенных мест. Затем сваренные листы отжигают, краска при этом испаряется; листы закладывают в пресс с фигурными выемками на плитах там, где должны находиться трубки теплообменника. Через участки, ранее покрытые краской, пропускают под давлением жидкость, они выпучиваются и образуют трубки теплообменника. Таким образом, сваривают листы длиной до 2540 мм и шириной до 380 мм.

В перспективе холодная сварка найдет несравненно более широкое применение.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается способ холодной сварки металлов?
2. Какие сварные соединения можно получить холодной сваркой?
3. Приведите основные схемы холодной сварки.
4. Какие основные параметры холодной сварки металлов?
5. В чем заключается способ холодной сварки сдвигом, каковы его преимущества?
6. Приведите основные характеристики материалов и оборудования для холодной сварки металлов.
7. Где применяется холодная сварка? Приведите примеры.

4. КОНТАКТНАЯ СВАРКА И ЕЕ РАЗНОВИДНОСТИ

4.1. Сущность контактного способа сварки и его разновидности

Контактная сварка относится к видам сварки с кратковременным нагревом места соединения без оплавления или с оплавлением и последующей осадкой разогретых заготовок. Характерная особенность этих процессов – пластическое деформирование, в ходе которого формируется сварное соединение.

Место соединения разогревается проходящим по металлу электрическим током, причем максимальное количество теплоты выделяется в месте сварочного контакта (рис. 4.1).

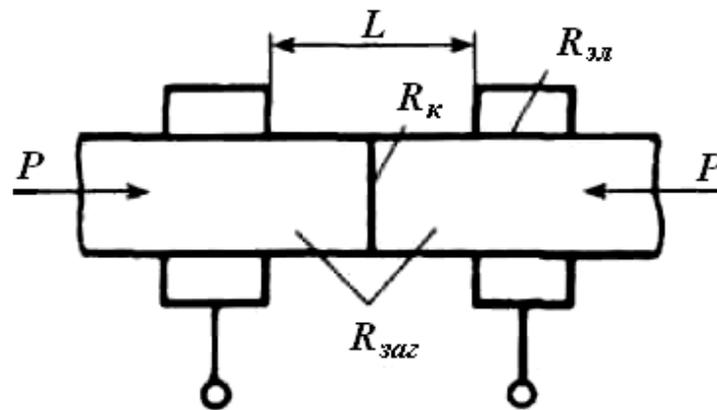


Рис. 4.1. Схема контактной сварки

Количество выделяемой теплоты определяется законом Джоуля-Ленца:

$$Q \approx I^2 \cdot R \cdot t, \quad (4.1)$$

где Q – количество теплоты, выделяемое в сварочном контуре, Дж;

I – сварочный ток, А;

R – полное электросопротивление сварочного контура, Ом;

t – время протекания тока, с.

Полное электросопротивление сварочного контура R состоит из электросопротивления выступающих концов L свариваемых заготовок $R_{заг}$, сварочного контакта $R_к$ и электросопротивления между электродами и заготовками $R_{эл}$:

$$R \approx R_{заг} + R_к + R_{эл}, \quad (4.2)$$

Электросопротивление $R_к$ имеет наибольшее значение, так как из-за неровностей поверхности стыка даже после тщательной обработки заготовки соприкасаются только в отдельных точках. В связи с этим действи-

тельное сечение металла, через которое проходит ток, резко уменьшается. Кроме того, на поверхности свариваемого металла имеются пленки оксидов и загрязнения с малой электропроводимостью, которые также увеличивают электросопротивление контакта. В результате в точках контакта металл нагревается до термопластичного состояния или до оплавления.

При непрерывном сдавливании нагретых заготовок пластичный металл в местах контакта деформируется, поверхностные оксидные пленки разрушаются и удаляются к периферии стыка. В соприкосновение приходят совершенно чистые слои металла, образующие сварное соединение.

4.2. Контактная стыковая сварка

Стыковая сварка – разновидность контактной сварки, при которой заготовки свариваются по всей поверхности соприкосновения. Свариваемые заготовки закрепляют в зажимах стыковой машины (рис. 4.2).

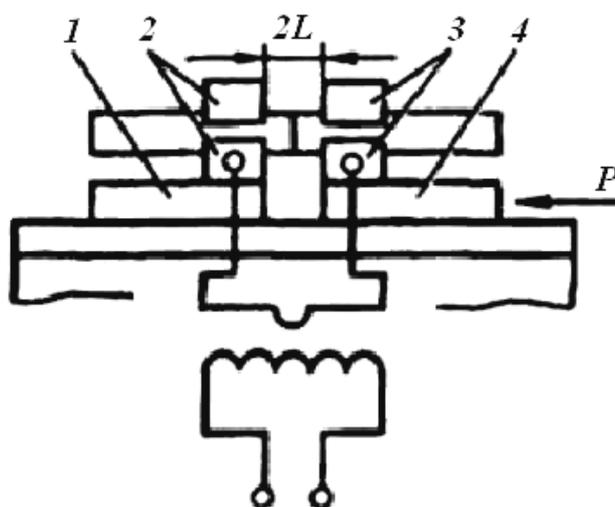


Рис. 4.2. Схема контактной стыковой сварки:

- 1) – неподвижная плита; 2) – зажим на неподвижной плите;
- 3) – зажим на подвижной плите; 4) – подвижная плита

Зажим 3 установлен на подвижной плите 4, перемещающейся в направляющих, зажим 2 укреплен на неподвижной плите 1. Сварочный трансформатор соединен с плитами гибкими шинами и питается от сети через включающее устройство. Плиты перемещаются, и заготовки сжимаются под действием силы P , обеспечиваемой механизмом осадки.

Стыковую сварку с разогревом стыка до пластичного состояния и последующей осадкой называют **сваркой сопротивлением**, а при разогреве торцов заготовок до оплавления и последующей осадкой – **сваркой оплавлением**.

4.2.1. Контактная стыковая сварка сопротивлением

Для правильного формирования сварного соединения необходимо, чтобы процесс протекал в определенной последовательности. Совместное графическое изображение тока и давления, изменяющихся в процессе сварки во времени, называют циклограммой сварки.

Циклограмма контактной сварки сопротивлением представлена на рис. 4.3. Заготовки сдавливаются силой P , включается ток, металл разогревается до пластического состояния, затем заготовки снова сдавливают – проводят осадку, одновременно отключая ток.

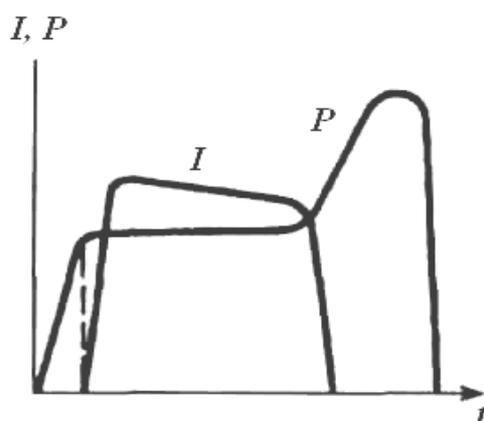


Рис. 4.3. Циклограмма контактной стыковой сварки:
 I – сила тока; P – усилие зажима

Перед стыковой сваркой сопротивлением заготовки должны быть очищены от оксидных пленок, и торцы их плотно пригнаны друг к другу предварительной механической обработкой.

Параметрами режима контактной стыковой сварки сопротивлением являются плотность тока j (A/mm^2), сила сжатия торцов заготовки P (Н) и время протекания тока t (с), которое определяют косвенно через величину осадки, зависящую от установочной длины L .

Установочной длиной L называют расстояние от торца заготовки до внутреннего края электрода стыковой машины, измеренное до начала сварки. Она зависит от теплофизических свойств металла, конфигурации стыка и размеров заготовки.

Типы сварных соединений, выполняемых стыковой сваркой сопротивлением, представлены на рис. 4.4. Этим способом соединяют заготовки малого сечения (до 100 мм^2), так как при больших сечениях нагрев будет неравномерным.

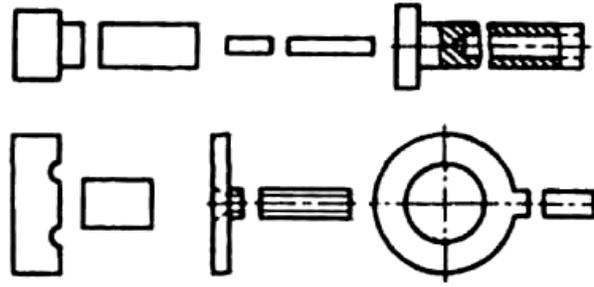


Рис. 4.4. Типы сварных соединений, выполняемых стыковой сваркой сопротивлением

Сечения соединяемых заготовок должны быть одинаковы по форме и с простым периметром (круг, квадрат, прямоугольник с малым отношением сторон). Сваркой сопротивлением можно сваривать низкоуглеродистые, низколегированные конструкционные стали, алюминиевые сплавы.

4.2.2. Контактная стыковая сварка оплавлением

Стыковая сварка оплавлением имеет две разновидности: *непрерывным* и *прерывистым* оплавлением.

При непрерывном оплавлении между заготовками, установленными в электродах машины, оставляют зазор, подключают источник тока и равномерно сближают заготовки. Соприкосновение происходит вначале по отдельным небольшим площадкам, через которые протекает ток высокой плотности. При этом, под действием магнитного поля расплавленный и кипящий металл выбрасывается наружу. После достижения равномерного оплавления всей поверхности стыка заготовки осаживают. Циклограмма сварки непрерывным оплавлением показана на рис. 4.5.

При прерывистом оплавлении зажатые заготовки сближают, приводят их в кратковременное соприкосновение и вновь отводят на небольшое расстояние.

Быстро повторяя одно за другим сближения и разъединения, выполняют оплавление всего сечения. Затем выключают ток и сдавливают заготовку. Под давлением часть расплавленного металла вместе с оксидами выдавливается из зоны сварки.

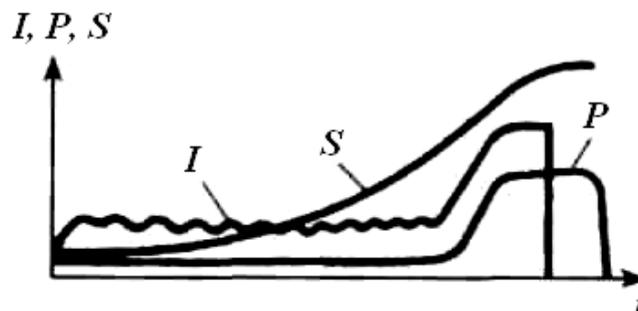


Рис. 4.5. Циклограмма контактной стыковой сварки оплавлением:
 S – перемещение плиты, мм; P – сила сжатия заготовок; I – сварочный ток

Сварка оплавлением имеет преимущества перед сваркой сопротивлением:

– в процессе оплавления выравниваются все неровности стыка, а оксиды и загрязнения удаляются, поэтому не требуется особой подготовки места соединения;

– можно сваривать заготовки с сечением сложной формы, а также заготовки с различными сечениями, разнородные металлы (быстрорежущую и углеродистую стали, медь и алюминий и т. д.).

Типы сварных соединений выполняемых стыковой сваркой оплавлением, приведены на рис. 4.6.

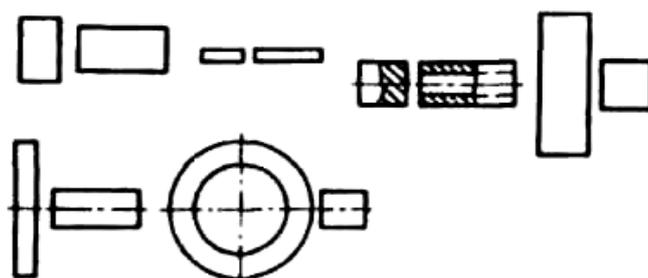


Рис. 4.6. Типы сварных соединений, выполняемых стыковой сваркой оплавлением

Наиболее распространенными изделиями, изготавливаемыми стыковой сваркой, служат элементы трубчатых конструкций, колеса и кольца, инструмент, рельсы и т. п.

4.3. Контактная точечная сварка

Точечная сварка – разновидность контактной сварки, при которой заготовки соединяются в отдельных точках. При точечной сварке заготовки собирают внахлестку и сжимают силой P между двумя электродами, подводщими ток к месту сварки (рис. 4.7).

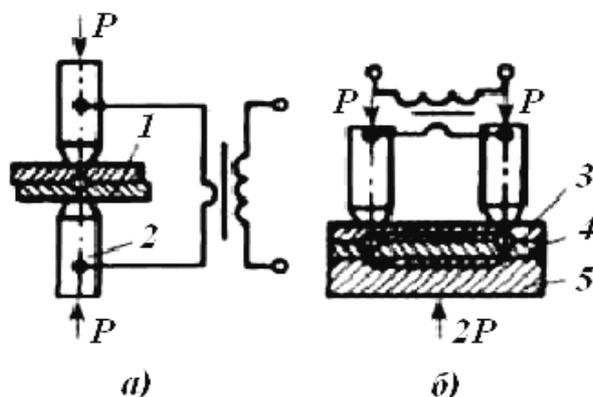


Рис. 4.7. Схема контактной точечной сварки:

- а) – двусторонняя сварка; б) – односторонняя сварка; 1) – заготовка; 2) – электрод; 3) – верхний лист; 4) – нижний лист; 5) – медная подкладка

Соприкасающиеся с медными электродами, поверхности свариваемых заготовок нагреваются медленнее их внутренних слоев. Нагрев продолжают до пластичного состояния внешних и до расплавления внутренних слоев. После этого выключают ток и несколько увеличивают, а затем снимают давление. В результате образуется литая сварная точка.

Точечная сварка в зависимости от расположения электродов по отношению к свариваемым заготовкам может быть дву- и односторонней:

- при двусторонней сварке (рис. 4.7, а) две (или больше) заготовки I сжимают между электродами 2 точечной машины;
- при односторонней сварке (рис. 4.7, б) ток распределяется между верхним и нижним листами 3 и 4, причем нагрев осуществляется частью тока, протекающего через нижний лист.

Для увеличения тока, проходящего через нижний лист, предусмотрена медная подкладка 5. Односторонней сваркой можно соединять заготовки одновременно двумя точками. Параметры режима точечной сварки: сила сжатия (H), плотность тока j (A/mm^2), время протекания тока t (с).

На рис. 4.8 показана одна из применяемых циклограмм точечной сварки.

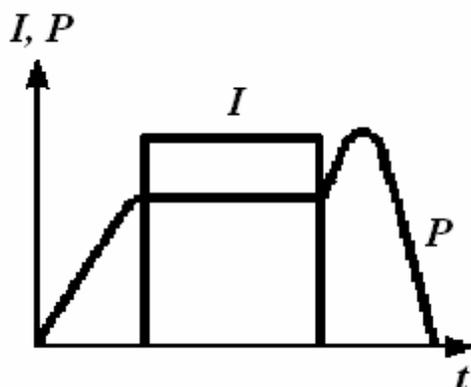


Рис. 4.8. Циклограмма контактной точечной сварки:
 I – сила тока; P – усилие зажима

Весь цикл сварки состоит из четырех стадий:

1. Сжатие свариваемых заготовок между электродами.
2. Включение тока и разогрев места контакта до температуры плавления, сопровождающийся образованием литого ядра точки.
3. Выключение тока и увеличение сжатия (проковка) для улучшения структуры сварной точки.
4. Снятие сжатия.

Перед сваркой место соединения очищают от оксидных пленок (наждачным кругом или травлением).

Типы сварных соединений, выполняемых точечной сваркой, показаны на рис. 4.9.

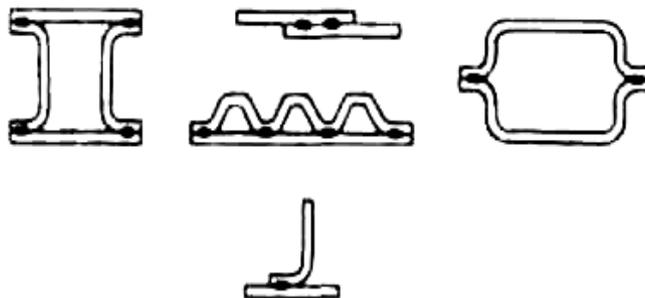


Рис. 4.9. Типы сварных соединений, выполняемых точечной сваркой

Точечной сваркой изготавливают штамповарные конструкции при соединении отдельных штампованных элементов сварными точками. В этом случае упрощается технология изготовления сварных узлов и повышается производительность. Точечную сварку применяют для изготовления изделий из низкоуглеродистых, углеродистых, низко- и высоколегированных сталей, алюминиевых сплавов. Толщина свариваемых металлов составляет 0,5... 5 мм.

Многоточечная контактная сварка – разновидность контактной сварки, когда за один цикл сваривается несколько точек. Многоточечную сварку выполняют по принципу односторонней точечной сварки. Машины для многоточечной сварки могут иметь от одной до 100 пар электродов; соответственно, можно сваривать 2... 200 точек за одну установку изделия.

Многоточечной сваркой сваривают одновременно и последовательно.

В первом случае все электроды сразу прижимают к изделию, что обеспечивает меньшее коробление и большую точность сборки. Ток распределяется между прижатыми электродами специальным токораспределителем, включающим электроды попарно.

Во втором случае пары электродов опускают поочередно или одновременно, а ток подключают поочередно к каждой паре электродов от сварочного трансформатора.

В массовом производстве, например в автомобильной промышленности, применяют, как правило, машины, работающие по заданной программе. Производительность их очень высока – до 1000 и более точек в минуту.

4.4. Контактная шовная сварка

Шовная сварка – разновидность контактной сварки, при которой между свариваемыми заготовками образуется прочное и плотное соединение. Электроды выполняют в виде плоских роликов, между которыми пропускают свариваемые заготовки.

В процессе шовной сварки листовые заготовки I собирают внахлестку, зажимают между электродами 2 (рис. 4.10) и пропускают ток.

При движении роликов по заготовкам образуются перекрывающиеся друг друга сварные точки, в результате чего получается непрерывный герметичный шов. Шовную сварку, как и точечную, можно выполнить при двустороннем (рис. 4.10, а) и одностороннем (рис. 4.10, б) расположениях электродов.

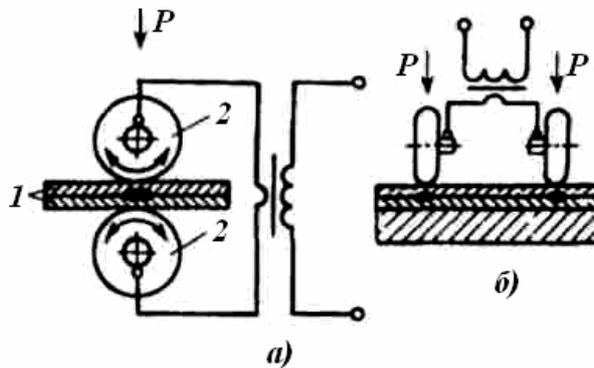


Рис. 4.10. Схема шовной сварки
а) – двусторонняя сварка; б) – односторонняя сварка

Последовательность этапов технологических операций вначале и по завершении сварки шва такая же, как при точечной. Сварку по циклограмме с непрерывным включением тока (рис. 4.11, а) применяют для коротких швов и сварки металлов и сплавов, не склонных к росту зерна и не претерпевающих заметных структурных превращений при перегреве околошовной зоны (низкоуглеродистые и низколегированные стали).

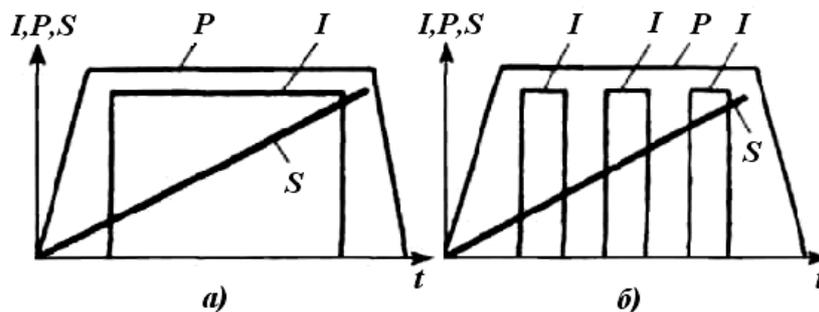


Рис. 4.11. Циклограммы шовной сварки:
 P – сила сжатия; S – перемещение роликов; I – сварочный ток; t – время
а) – непрерывного включения тока; б) – прерывистого включения тока

Циклограмма с прерывистым включением тока (рис. 4.11, б) обеспечивает стабильность процесса и высокое качество сварного соединения при малой зоне термического влияния. Ее используют при сварке длинных швов на заготовках из высоколегированных сталей и алюминиевых сплавов.

Шовная контактная сварка – очень высокопроизводительный процесс, скорость его может достигать 10 м/мин. Особенно эффективно ее применение в массовом производстве листовых конструкций для получения прочных и герметичных швов, например при изготовлении емкостей. Допустимая толщина свариваемых заготовок 0,3... 3 мм.

4.5. Оборудование для контактной сварки

Контактную сварку выполняют с помощью специальных контактных машин. Контактные машины в зависимости от типа выполняемого на них соединения подразделяют на стыковые, точечные и шовные. Контактная машина состоит из трех основных частей: источника тока, прерывателя тока и механизма давления.

Электрическая схема контактных машин включает в себя трансформатор, прерыватель тока и переключатель ступеней мощности (рис. 4.12).

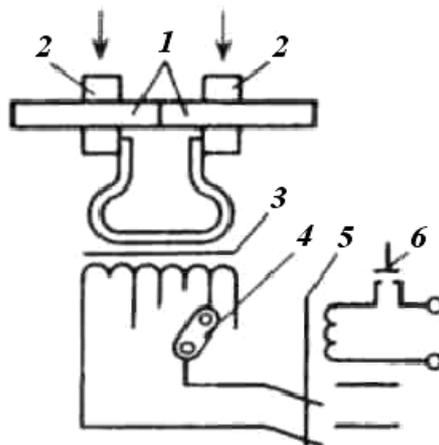


Рис. 4.12. Электрическая схема контактной машины: 1 – свариваемые изделия; 2 – контактные колодки; 3 – сварочный трансформатор; 4 – регулятор тока; 5 – электромагнитный прерыватель тока; 6 – включающая кнопка

Первичную обмотку трансформатора подключают к сети с напряжением 220... 380 В; ее изготовляют секционной для изменения числа рабочих витков при переключении ступени мощности. Вторичная обмотка трансформатора состоит из одного или двух витков (вторичное напряжение 1... 12 В). Сила вторичного тока составляет 1000... 100 000 А.

При изменении числа витков первичной обмотки изменяется коэффициент трансформации K :

$$K = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{U_1}{U_2}, \quad (4.3)$$

где ω_1 и ω_2 – число витков первичной и вторичной обмоток;

U_1 и U_2 – соответственно первичное и вторичное напряжения обмотки.

Вторичное напряжение:

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{\omega_2}{\omega_1}, \quad (4.4)$$

где $\omega_2 = 1$;

U_1 – величина постоянная.

Следовательно, для изменения U_2 необходимо изменить число включенных витков первичной обмотки ω_1 ; соответственно, будет изменяться и сила тока.

В процессе сварки приходится периодически, а часто и с весьма большой частотой включать и выключать ток. Для этой цели применяют прерыватели тока нескольких типов: простые механические контакторы, электромагнитные, электронные и полупроводниковые приборы.

Механические контакторы применяют, главным образом, на стыковых и точечных машинах неавтоматического действия небольшой мощности. *Электромагнитные контакторы* применяют для стыковой, точечной и шовной сварки на машинах малой и средней мощности.

Электронные и полупроводниковые приборы (тиристоры) обеспечивают включение и выключение тока со строго определенной продолжительностью импульсов тока и пауз. Их применяют для всех типов контактных машин автоматического действия.

Механизмы давления служат для сжатия заготовок между электродами машины, они могут иметь рычажно-педальный, электромеханический или пневматический привод.

Машины для стыковой сварки выпускают мощностью 5... 500 кВА. Стыковые машины мощностью до 25 кВА применяют для сварки сопротивлением сталей и цветных металлов; мощностью 25... 250 кВА – для сварки сопротивлением и оплавлением стальных заготовок большого сечения; мощностью 150... 500 кВА – для автоматической сварки оплавлением с подогревом.

Машины для точечной сварки выпускают мощностью 0,1... 250 кВА. Точечные машины мощностью 0,1... 25 кВА применяют для сварки заготовок толщиной 0,1... 2 мм из сталей и цветных металлов; мощностью 50... 100 кВА с пневматическим или электромеханическим приводом сжатия – для автоматической сварки в массовом производстве; мощностью 75... 250 кВА с пневматическим приводом и электронными прерывателями тока – для сварки заготовок толщиной от 2 мм и выше. Эти машины могут быть использованы также для рельефной сварки.

Современные точечные машины, предназначенные для массового производства, иногда являются частью робототехнических комплексов, управляемых ЭВМ.

Машины для шовной сварки по конструктивному оформлению близки к машинам для точечной сварки и отличаются от них формой электродов, выполненных в виде роликов, и наличием провода вращения роликов. Шовные машины выпускают мощностью 25... 200 кВА. В зависимости от способа шовной сварки (непрерывное или прерывистое включение тока) их снабжают механическими или электронными прерывателями тока.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается сущность контактного способа сварки, и каковы его разновидности?
2. Охарактеризуйте способ контактной стыковой сварки, приведите ее схему.
3. В чем отличие контактной стыковой сварки сопротивлением от контактной стыковой сварки оплавлением?
4. Дайте характеристику контактной стыковой сварки сопротивлением, приведите циклограмму сварки.
5. Дайте характеристику контактной стыковой сварки оплавлением, приведите циклограмму сварки.
6. Приведите примеры сварных соединений, выполняемых стыковой сваркой сопротивлением и оплавлением.
7. Каковы преимущества контактной стыковой сварки оплавлением перед контактной стыковой сваркой сопротивлением?
8. В чем сущность контактной точечной сварки, каковы ее разновидности?
9. Перечислите стадии цикла контактной точечной сварки.
10. Что представляет собой многоточечная контактная сварка?
11. В чем сущность контактной шовной сварки, каковы ее разновидности?
12. Расскажите об особенностях оборудования применяемого для контактной сварки.

5. СВАРКА АККУМУЛИРОВАННОЙ ЭНЕРГИЕЙ

5.1. Сущность, разновидности сварки аккумулятивной энергией

Сущность **сварки аккумулятивной энергией** заключается в том, что кратковременный сварочный процесс осуществляется за счет энергии, запасенной соответствующим приемником, непрерывно заряжающимся и периодически разряжающимся на сварку.

Существует 4 разновидности сварки аккумулятивной энергией:

1. конденсаторная;
2. электромагнитная;
3. инерционная;
4. аккумуляторная.

Накопление энергии соответственно происходит в батарее конденсаторов, в магнитном поле специального сварочного трансформатора, во вращающихся частях генератора или в аккумуляторной батарее.

5.2. Конденсаторная сварка

Наибольшее промышленное применение получила конденсаторная сварка. Энергия в конденсаторах накапливается при их зарядке от источника постоянного тока (генератора или выпрямителя), а затем в процессе их разрядки преобразуется в теплоту, используемую для сварки. Накопленную в конденсаторах энергию A (Дж) можно регулировать изменением емкости и напряжения зарядки:

$$A = \frac{C \cdot U^2}{2}, \quad (5.1)$$

где C – емкость конденсаторов, Ф;

U – напряжение зарядки конденсатора, В.

При конденсаторной сварке характерны:

- точная дозировка количества энергии, не зависящая от внешних условий, в частности от напряжения сети;
- малое время протекания тока (тысячные и десятитысячные доли секунды) при высокой плотности тока, обеспечивающее небольшую зону термического влияния, что позволяет сваривать материалы малых толщин (до нескольких микрон) и разнородные материалы между собой;
- способ отличается невысокой потребляемой мощностью (0,2... 2 кВА).

Существуют два способа конденсаторной сварки:

1. **бестрансформаторная**, когда конденсаторы разряжаются непосредственно на свариваемые детали;

2. **трансформаторная**, когда конденсатор разряжается на первичную обмотку сварочного трансформатора, во вторичной цепи которого между электродами помещены предварительно сжатые свариваемые заготовки.

Примером бестрансформаторной сварки служит ударная конденсаторная сварка (рис. 5.1, а), когда концы обкладок конденсатора подключены непосредственно к свариваемым заготовкам 2 и 3, одна из которых жестко закреплена, а другая может перемещаться в направляющих 5. Если освободить защелку 4, удерживающую заготовку 2, то под действием пружины 1 она быстро переместится по направлению неподвижной заготовки 3 и ударится об нее. Перед соударением возникает мощный разряд за счет энергии, накопленной в конденсаторе. Этот разряд оплавляет торцы обеих заготовок, которые после соударения свариваются между собой под действием силы осадки.

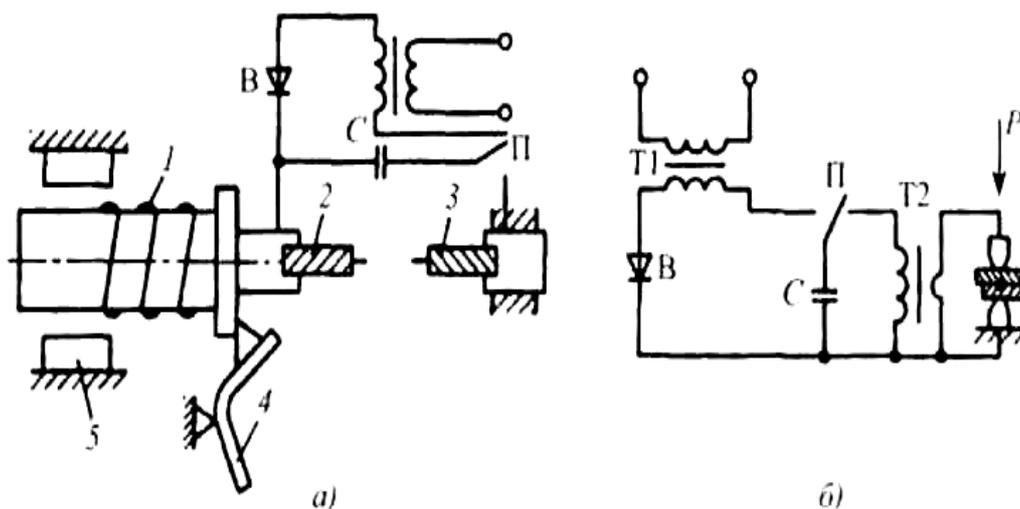


Рис. 5.1. Схемы конденсаторной сварки:

а – бестрансформаторной; б – трансформаторной;

Т1 – повышающий трансформатор; Т2 – сварочный трансформатор;

С – конденсаторная батарея; В – выпрямитель; П – переключатель

Бестрансформаторной сваркой можно сваривать встык проволоки и тонкие стержни разной толщины из разнородных металлов (вольфрам – никель, молибден – никель, медь – константан).

Трансформаторная конденсаторная сварка предназначена в основном для точечной и шовной сварки, но может быть использована и для стыковой. При этом способе разряд конденсатора преобразуется с помощью сварочного трансформатора (рис. 5.1, б). В левом положении переключателя

П конденсатор C заряжается от источника постоянного тока. В правом положении переключателя происходит разряд конденсатора на первичную обмотку сварочного трансформатора $T2$. При этом во вторичной обмотке индуцируется ток большой силы, обеспечивающий сварку предварительно зажатых между электродами заготовок.

Конденсаторную сварку применяют в производстве электроизмерительных и авиационных приборов, часовых механизмов, фотоаппаратов, элементов полупроводников, электронных схем и т. п.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается сущность сварки аккумулированной энергией, и каковы ее разновидности?
2. Дайте характеристику конденсаторной сварки.
3. Раскройте сущность бестрансформаторной и трансформаторной конденсаторной сварки.
4. Приведите схемы бестрансформаторной и трансформаторной конденсаторной сварки.
5. Где применяется бестрансформаторная и трансформаторная конденсаторная сварки?

6. СВАРКА МЕТАЛЛОВ ТРЕНИЕМ

6.1. Сущность сварки металлов трением, ее преимущества и недостатки

Сварка трением происходит в твердом состоянии при воздействии теплоты, возникающей при трении поверхностей свариваемого изделия (рис. 6.1). Трение поверхностей осуществляют вращением свариваемых деталей, сжимаемых усилием P , как это показано на рис. 6.1. В процессе сварки наблюдаются значительные пластические деформации на свариваемых поверхностях.

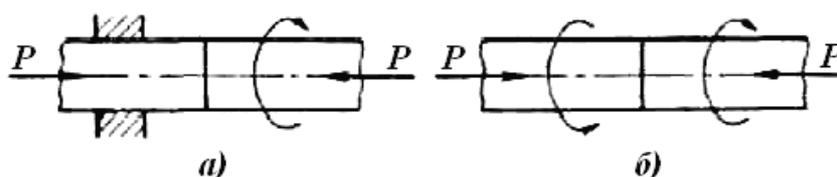


Рис. 6.1. Принципиальные схемы сварки трением:
 a — вращение одной детали, b — вращение обеих деталей

Прочное сварное соединение образуется в результате возникновения металлических связей между ювенильными (чистыми) контактирующими поверхностями свариваемых деталей. Препятствующие образованию этих связей различные включения и пленки, покрывающие металлические поверхности, разрушаются при трении и удаляются из зоны сварки в радиальном направлении вследствие значительной пластической деформации трущихся поверхностей.

На поверхностях деталей, прижатых усилием P , возникают силы трения. Работа, затрачиваемая на преодоление этих сил, превращается в теплоту, которая выделяется на поверхностях трения и вызывает интенсивный нагрев металла до температур, необходимых для образования сварного соединения; применительно к сварке сталей эти температуры, в зависимости от режима процесса, составляют 950 – 1300 °С (1223 – 1573 К). По достижении требуемой температуры относительное движение деталей должно быть по возможности быстро (практически мгновенно) прекращено. Процесс образования сварного соединения завершают проковкой: к нагретым, но уже неподвижным деталям на некоторое время прикладывают сжимающее усилие. После проковки происходит естественное охлаждение сварных деталей.

Преимущества сварки трением:

– объем тонкого слоя нагреваемого металла настолько незначителен, что весь цикл его нагрева обычно укладывается в весьма малый промежуток времени – от нескольких секунд до полминуты, поэтому производительность сварки трением весьма высока, и конкурировать с ней может лишь электрическая контактная сварка;

– малый объем металла, нагреваемого при сварке трением, предопределяет и исключительно высокие энергетические характеристики процесса; расход энергии и мощность установок (рис. 6.2) при сварке трением в 5 – 10 раз меньше, чем при контактной сварке;

– высокое качество получаемых сварных соединений. При правильно выбранном режиме сварки металл стыка и прилегающих к нему зон обладает прочностью и пластичностью не меньшими, чем основной металл свариваемых деталей. Это объясняется следующим:

1. Все окисные и адсорбированные пленки и различные инородные частицы в процессе сварки трением удаляются из стыка в грат благодаря деформированию металла в радиальных направлениях. Плотный контакт между поверхностями трения препятствует образованию окислов в процессе сварки.

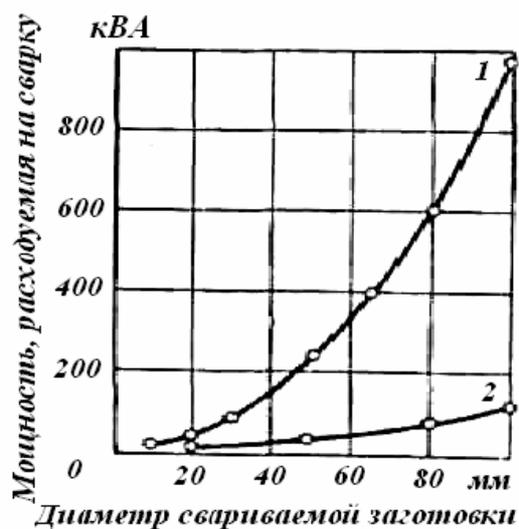


Рис. 6.2. Потребляемая из сети мощность:

1 – при электрической контактной сварке; 2 – при сварке трением

2. В стыке и прилегающих к нему зонах термического влияния металл приобретает структуру с равноосным и резко измельченным зерном; такая структура образуется в результате быстрого локального нагрева малых объемов металла и высоких скоростей их охлаждения в присутствии значительных давлений, достигающих 300 – 500 атм. ($29,4 - 49,0 \text{ МН/м}^2$) и более, кроме того, имеет место механическое измельчение зерен в процессе трения.

– сварные соединения, выполненные с помощью сварки трением, обладают высокими механическими показателями (временное сопротивление разрыву, угол изгиба, ударная вязкость). Это объясняется:

1. Постоянством основных параметров процесса (скорости относительного вращения, величины осевого усилия и продолжительности нагрева).

2. Свойства сварного соединения практически не зависят от таких внешних факторов, как колебания питающей сети, качество вспомогательных материалов, квалификация и степень утомленности сварщика и т. п., которые при других видах сварки в значительной мере влияют на стабильность свойств сварных соединений.

– получение прочных соединений не только из одноименных, но и из большого числа сочетаний разноименных металлов и сплавов, в том числе и таких, теплофизические характеристики которых резко различны.

– Основные параметры процесса сварки трением сравнительно легко программируются. Оборудование для сварки трением – это полуавтоматы с минимальным использованием ручного труда либо автоматы, работа которых протекает без участия человека.

Недостатки сварки трением:

– Применение сварки трением ограничено формой и размерами сечения свариваемых деталей. При использовании вращательного движения сварка трением позволяет получить хорошие результаты лишь в тех случаях, когда одна из деталей представляет собой тело вращения (стержень или трубу), ось которого совпадает с осью вращения, а другая деталь обладает плоской поверхностью (рис. 6.3).

– На поверхностях трения недопустима окалина; ее присутствие может привести к образованию недоброкачественного соединения.

– Возможность использования сварки трением ограничивается также и размерами сечения свариваемых деталей в месте их сопряжения. Расчеты показывают, что использовать этот процесс для сварки стержней сплошного сечения диаметром более 200 мм при современном уровне развития техники нецелесообразно. Для сварки таких стержней (сечением более 30 000 мм²) потребовалась бы машина с электродвигателем мощностью порядка 500 кВт, при частоте вращения около 100 – 150 об/мин и с осевым усилием более 300 тс (294 МН).

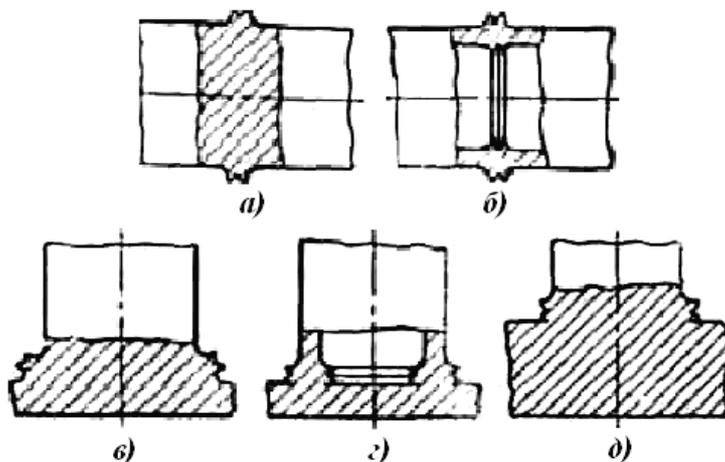


Рис. 6.3. Типы сварных соединений, выполненных с помощью сварки трением:

a – стержни встык; *б* – трубы встык; *в* – стержень и труба встык;

г и *д* – соединения стержня и трубы с плоской поверхностью детали

Диапазон площадей сечений деталей, которые целесообразно сваривать трением, составляет 30 – 8000 мм². Расширить возможности применения сварки трением крупных деталей, вращение и, в особенности, быстрое торможение которых в конце процесса сильно затруднено, можно путем вращения вспомогательной детали (третьего тела), зажатой между двумя невращающимися и подлежащими сварке деталями (рис. 6.4). Эта схема процесса позволяет также сварить две (крайние) детали.

На рис. 6.5 показана схема процесса сварки вибротрением, отличительная особенность которого – сообщение одной из свариваемых деталей возвратно-поступательного движения в плоскости трения с относительно малыми амплитудами. В этом случае можно сваривать детали с различной формой поперечного сечения.

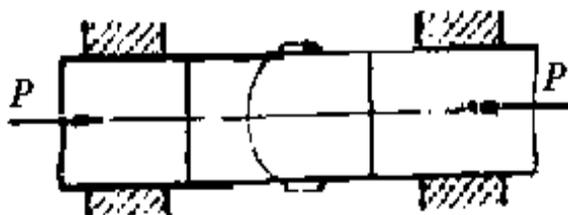


Рис. 6.4. Сварка двух неподвижных деталей с помощью вращающейся третьей детали

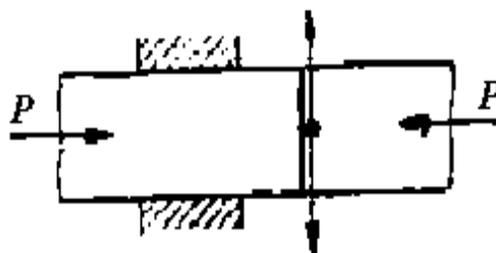


Рис. 6.5. Сварка вибротрением (возвратно-поступательные движения в плоскости стыка с относительно малыми амплитудами при звуковой частоте)

6.2. Характеристика теплового режима сварки

Тепловой режим определяет производительность процесса, прочность сварного соединения, параметры сварочного оборудования и т. п.

Исследования показали, что при сварке трением максимальное выделение теплоты происходит на периферии поверхности трения, на оси вращения выделение теплоты равно нулю.

При рассмотрении зависимостей изменения тепловыделения во времени весь процесс нагрева при сварке трением можно условно разделить на три фазы (рис. 6.6).

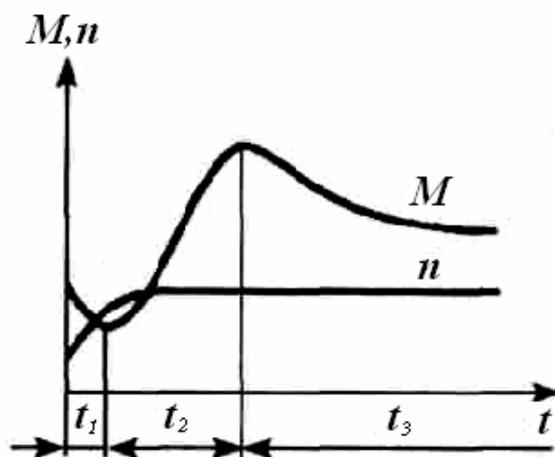


Рис. 6.6. Зависимость потребляемой мощности M и частоты вращения n на различных стадиях процесса сварки трением

Во время первой фазы t_1 устанавливается номинальная частота вращения. Эта фаза, характеризуется малыми значениями коэффициента трения вследствие перехода от твердого к жидкому трению. Происходят нагрев и схватывание отдельных точек.

Во время второй фазы t_2 идет быстрое нарастание потребляемой мощности и температуры в контакте; в трении участвует вся поверхность стыка.

Наиболее длительная третья фаза t_3 , во время которой выделяется основная часть теплоты и происходит выравнивание температуры по стыку. Это сопровождается спадом потребляемой мощности, что объясняется снижением прочности металла в стыке в связи с повышением температуры.

В первой и второй фазах процесса тепловыделение незначительно, основное количество теплоты выделяется в третьей фазе. Количество теплоты, выделенной в первой фазе – 1 %, во второй – 12 %, в третьей – 87 %. Нагрев деталей до состояния повышенной пластичности, необходимой для образования прочного сварного соединения, происходит в третьей фазе процесса.

Сварное соединение образуется лишь после прекращения тепловыделения (вращения).

6.3. Подготовка деталей к сварке

Подготовка деталей к сварке должна учитывать следующие требования:

1. Детали перед сваркой следует очищать от жира и загрязнений, например, протиркой их торцовых поверхностей чистой тряпкой; в большинстве случаев этого вполне достаточно, и лишь иногда приходится прибегать к обезжириванию этих поверхностей химическими средствами.

2. Тонкие окисные пленки на соединяемых поверхностях при сварке деталей из одноименных металлов почти не влияют на течение процесса нагрева: они быстро разрушаются при трении и их обломки выносятся из стыка вытесняемым в радиальных направлениях металлом. На поверхностях трения недопустимо присутствие окалины. На деталях, подвергавшихся до сварки ковке, штамповке или некоторым видам термообработки, эти поверхности должны быть очищены от окалины любым доступным способом.

3. Подготовка торцовых поверхностей под сварку трением может быть выполнена самыми различными способами: подрезкой на токарном станке, рубкой на ножницах и под прессом, разрезкой пилой или наждачным кругом и т. п.

4. При соединении встык двух деталей одинакового диаметра, металлы которых обладают различной степенью пластичности при температурах свар-

ки, требования к подготовке торцов несколько усложняются: для деталей из более твердого и плохо деформирующегося металла требуются более жесткие допуски на обработку торца. Если одна из деталей в процессе сварки практически не деформируется вовсе (например, сталь при сварке с алюминием), требуется очень тщательная подготовка поверхности торца такой детали.

5. К боковым поверхностям деталей при сварке трением никаких требований не предъявляется; они могут быть покрыты маслом, окалиной или ржавчиной; это не отражается на свойствах получаемого сварного соединения. Этим сварка трением выгодно отличается от других видов сварки.

6.4. Физико-механические свойства сварных соединений

Исследования механических свойств сварного соединения, полученного с помощью сварки трением, и свойств металла в нем показали:

1. При правильно выбранных режимах сварки металл обладает сплошностью структуры, инородные включения, поры и другие макродефекты отсутствуют.

2. Разрушение сварных образцов при испытании на растяжение статической нагрузкой всегда происходило вдали от стыка и вне зоны изменения зерна.

3. Ударная вязкость зоны сварного соединения близка к ударной вязкости основного металла.

4. Высокая прочность сварного соединения при сварке трением объясняется специфическими условиями образования сварного соединения:

- сварка трением происходит под действием интенсивного локализованного и кратковременного воздействия теплоты, выделяющейся на свариваемых поверхностях, высокой степени пластической деформации и при очень хорошей, защите места сварки от действия кислорода и азота воздуха;

- пластическая деформация металла сопровождается непрерывным удалением части металла из зоны сварки; при этом происходит своеобразная термомеханическая обработка металла в этой зоне;

- металл сварного соединения обладает весьма мелкокристаллическим строением и сохраняет остаточный наклеп.

Сваркой трением можно соединять разноименные металлы, обладающие резко различными теплофизическими характеристиками, и такие, при сварке которых обычными методами получают недоброкачественные швы: меди со сталью, меди со сплавом «ковар», меди с алюминием и некоторыми его сплавами, алюминия с титаном и т. п.

6.5. Приемы, применяемые при сварке тонкостенных труб и Т-образных соединений

Сварка деталей с одинаковыми размерами сечений, как правило, не представляет большого труда и обеспечивает высокие механические показатели: временное сопротивление, угол изгиба, ударную вязкость и др. Для закаливающих металлов это достигается после соответствующей термообработки.

При сварке тонкостенных трубчатых деталей обычно возникает ряд затруднений. Для их сварки можно рекомендовать следующие приемы:

1. Короткие трубчатые детали со сквозными гладкими отверстиями сваривать, предварительно вставив внутрь пробки из твердого материала (рис. 6.7). Минимального эксцентриситета (при очень тонкостенных трубах) достигают с помощью взаимной центровки этих пробок, например, так, как показано на рис. 6.8. Для уменьшения износа круглого пальца одной пробки и соответствующего отверстия в другой пробке, последняя может быть снабжена шарикоподшипником.

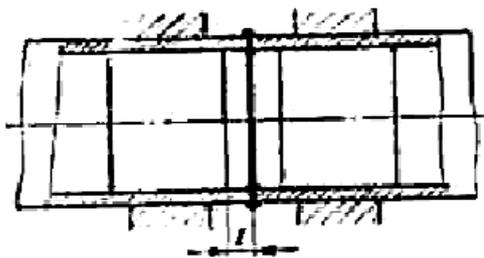


Рис. 6.7. Сварка трубчатых деталей с предварительно вставленными пробками

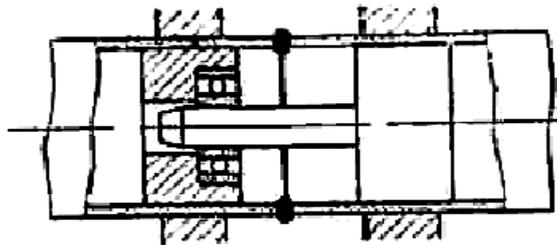


Рис. 6.8. Взаимная центровка трубчатых деталей

2. Если по условиям производства внутрь деталей вставлять пробки нельзя, то их заменяют охватывающими кольцами.

3. Машины, предназначенные для сварки труб, снабжают многокулачковыми зажимами, позволяющими охватить трубы почти по всей ее окружности (рис. 6.9).

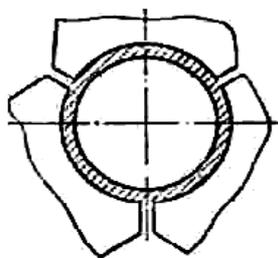


Рис. 6.9. Зажимы, охватывающие трубу снаружи

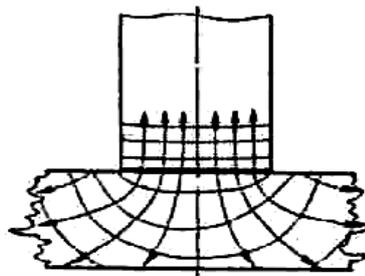


Рис. 6.10. Температурное поле в Т-образном соединении

В Т-образных соединениях стержень или трубу приваривают впри-
тык к плоской поверхности другой детали.

Основная особенность сварки таких соединений – асимметрия темпера-
турного поля. От плоского источника на поверхности трения теплота распро-
страняется фронтально вдоль оси стержня и в направлениях, нормальных к не-
которой сферической поверхности в теле другой детали (рис. 6.10). Это разли-
чие в интенсивности теплоотвода по обе стороны от поверхности трения вы-
зывает асимметрию температурного поля. В стержне наблюдаются более вы-
сокие температуры, чем в пластине, поэтому в стержне происходит процесс
глубинного вырывания частиц металла, тогда как в массивной и менее прогре-
той пластине имеет место лишь эффект поверхностного полирования.

Для обеспечения высокого, качества Т-образных соединений при их
сварке трением необходимо выполнение некоторых специальных приемов.

Первый прием

Торцевать поверхность плоской детали в машине для сварки тре-
нием, после чего (не переставляя ее, в зажиме) проводить сварку; искусст-
венно сводить сварку асимметричного Т-образного соединения к сварке
симметричного соединения. Для этого на детали с плоской поверхностью
заранее протачивают выступ (рис. 6.11) диаметром, равным диаметру при-
вариваемого стержня, и высотой 3 – 6 мм для сталей и несколько более для
пластичных металлов.

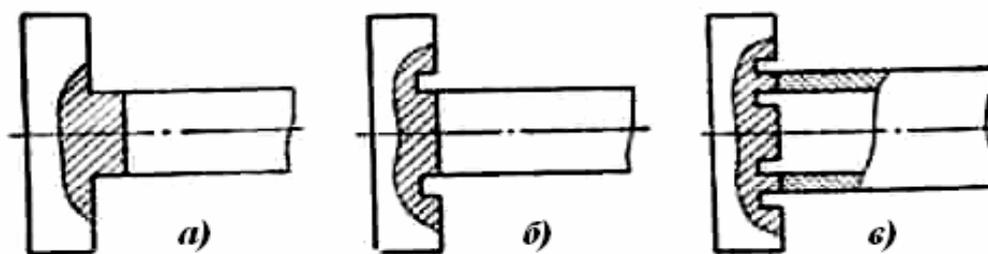


Рис. 6.11. Подготовка плоской детали перед сваркой
Т-образного соединения пластины со стержнем (а и б) и с трубой (в)

Второй прием

На торцевой поверхности массивной детали заранее протачивают
кольцевую канавку (рис. 6.11, б) для сварки этой детали со стержнем.

Третий прием

Для соединения с трубой плоскую деталь подготавливают, как пока-
зано на рис. 6.11, в. Надежное соединение трубы с фланцем рекомендуется
выполнять также по схеме, представленной на рис. 6.11, в.

6.6. Применяемое оборудование

Для сварки трением необходимо специальное оборудование, которое должно быть рассчитано на работу при достаточно больших скоростях вращения и осевых усилиях, позволяло бы быстрый запуск и мгновенную остановку шпинделя машины, обладало достаточной прочностью для восприятия и гашения значительных радиальных вибраций, возникающих в процессе сварки, и удовлетворяло ряд других требований. Этим требованиям не отвечают обычные металлорежущие (токарные, фрезерные, сверлильные) станки, применение которых для сварки трением даже после соответствующей реконструкции может быть допущено лишь в виде исключения и только при выполнении неотвественных работ.

Современные машины для сварки трением достаточно сложны, состоят из большого числа следующих элементов и узлов (рис. 6.12): два зажима 5 и 7 для подлежащих сварке деталей 6; передняя бабка 4 со шпинделем, несущим на себе вращающийся зажим 5; узел 8, в котором размещен невращающийся зажим 7; привод вращения шпинделя с электродвигателем 1, ременной передачей 2 и устройством для натяжения ремней; фрикционная муфта 3 для сцепления шпинделя с приводным устройством, а также для торможения шпинделя; пневматические или гидравлические цилиндры 9, обеспечивающие создание необходимого рабочего (осевого) усилия машины; пневматическая, пневмогидравлическая или гидравлическая схема управления силовым приводом машины; электрическая схема управления машиной; станина машины, шкаф управления.

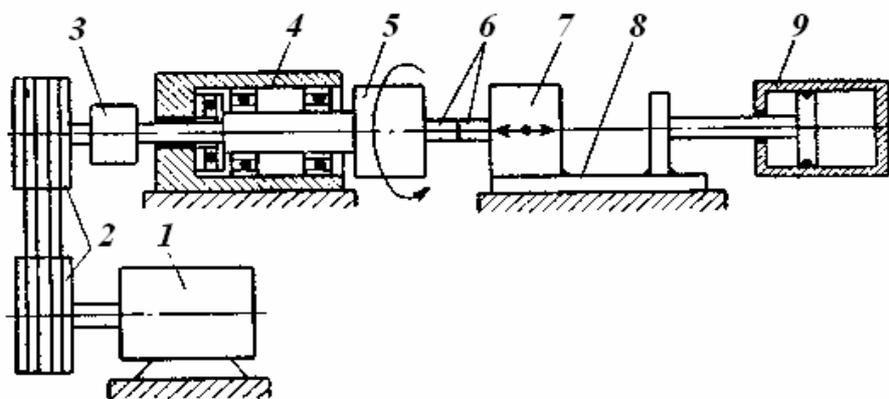


Рис. 6.12. Принципиальная конструктивно-кинематическая схема современной машины для сварки трением: 1) – шпиндель электродвигателя; 2) – ременная передача; 3) – фрикционная муфта; 4) – передняя бабка; 5) – вращающийся зажим; 6) – свариваемые детали; 7) – невращающийся зажим; 8) – узел; 9) – пневматический или гидравлический цилиндр

В соответствии с типажом на оборудование во ВНИИЭСО разработаны четыре типоразмера машин-полуавтоматов: МСТ-23, МСТ-35, МСТ-41, МСТ-51.

Таблица 6.1

Технические характеристики машин типа МТС

Показатели	МСТ-23	МСТ-35	МСТ-41	МСТ-51
Мощность, кВт	10	22	40	75
Осевое усилие, кгс:				
- при нагреве	2500	5 000	10 000	20 000
- максимальное	5000	10 000	20 000	40 000
Диаметр свариваемых стержневых заготовок, мм:				
- минимальный	10	16	22	32
- максимальный	25	36	50	70
Максимальный диаметр заготовок, мм	32	39	52	75
Производительность сварок в час	150	120	100	70

Весь цикл сварки выполняется автоматически после нажатия на соответствующие кнопки на пульте управления. Вручную лишь закладывают заготовки в зажимы машины (после чего происходит автоматическое их зажатие) и снимают сваренные детали.

Оборудование для сварки трением сравнительно сложное и дорогое, а сам процесс высокопроизводителен. Максимальный экономический эффект от его внедрения достигается в массовом или серийном производстве при изготовлении деталей относительно крупными партиями или групповым методом. В этих случаях следует использовать полуавтоматы и автоматы. В мелкосерийном производстве для сварки трением следует использовать машины, более простые и легко переналаживаемые при переходе от сварки одной детали к сварке другой.

6.7. Промышленное применение сварки трением

Сварка трением успешно применяется при изготовлении концевой режущего инструмента, например сверл средних размеров. Экономический эффект, получаемый в результате использования сварки трением заготовок инструмента, обусловлен значительным снижением брака и затрат труда и весьма существенной экономией дефицитной быстрорежущей стали. Замена электрической контактной сварки встык заготовок инструмента сваркой трения дает большую экономию.

Сваркой трением также изготавливают мерительный инструмент и детали вращающегося центра для токарных станков. Гладкие и резьбовые

калибры ранее изготавливали из дорогой стали марки ШХ методом ковки в несколько переходов. При использовании сварки трением (рис. 6.13) заготовку выполняют составной: на автомате хвостовик из стали 45 приваривают к рабочей части из стали ШХ. В результате – экономия дорогой хромистой стали и значительное увеличение производительности труда.

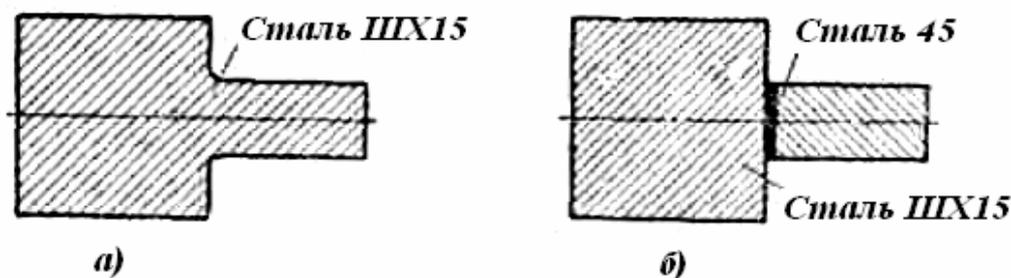


Рис. 6.13. Изготовление калибров:
а – по старой технологии; *б* – с применением сварки трением

До применения сварки трением клапаны двигателей внутреннего сгорания были цельноштампованными (рис. 6.14); их получали из дорогой стали путем отрезки и горячей штамповки в несколько переходов. Новая технология с применением сварки трением состоит из большего числа операций. Однако затраты на внедрение новой технологии окупались сокращением расхода жаропрочной стали, повышением производительности труда и высвобождением тяжелого ковочного оборудования.

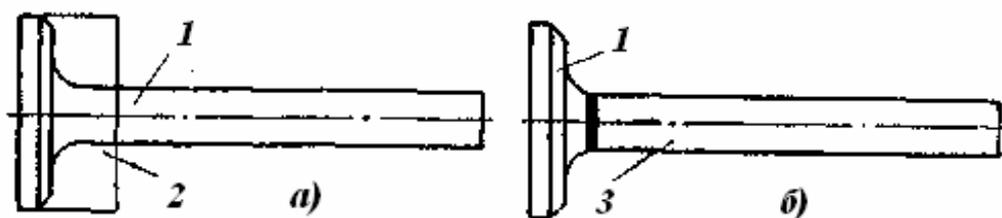


Рис. 6.14. Изготовление клапана:
а – по старой технологии; *б* – с применением сварки трением;
1 – жаропрочная сталь; *2* – заготовка; *3* – углеродистая сталь

Сварка трением успешно внедрена не только в тракторостроении, автомобилестроении, при производстве двигателей внутреннего сгорания, но также и при изготовлении труб, в ракетостроении, в строительной индустрии, в сельхозмашиностроении, в электротехнической и энергомашиностроении, в станкостроении и при изготовлении изделий многих других отраслей производства.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается сущность сварки металлов трением?
2. Каковы преимущества и недостатки сварки трением?
3. Перечислите основные схемы сварки трением. В чем сущность сварки вибротрением?
4. Охарактеризуйте тепловой режим сварки трением.
5. Как производится подготовка деталей к сварке трением?
6. Дайте характеристику физико-механическим свойствам изделий полученных сваркой трением.
7. Какие применяются приемы при сварке трением тонкостенных труб и Т-образных соединений?
8. Какое применяется оборудование для сварки трением? Приведите принципиальную схему установки для сварки трением.
9. Приведите примеры промышленного применения сварки трением.

7. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ СВАРКА

7.1. Сущность процесса сварки и ее разновидности

Ультразвуковая сварка относится к процессам, в которых используют давление и взаимное трение в свариваемых поверхностях. Силы трения возникают в результате действия на заготовки, сжатые осевой силой P , механических колебаний с ультразвуковой частотой.

Применение ультразвука:

- может быть источником энергии для создания точечных и шовных соединений;
- ультразвуковые колебания активно разрушают естественные и искусственные пленки, что позволяет сваривать металлы с окисленной поверхностью, покрытые слоем лака и т. п.;
- снижает или снимает собственные напряжения и деформации, возникающие при сварке;
- стабилизирует структурные составляющие металла сварного соединения, устраняя возможность самопроизвольного деформирования сварных конструкций со временем.

Для получения механических колебаний высокой частоты обычно используется магнитострикционный эффект, состоящий в изменении раз-

меров некоторых металлов и сплавов под действием переменного магнитного поля. Для ультразвуковых преобразователей обычно используют чистый никель или железо-кобальтовые сплавы. Изменения размеров магнитострикционных материалов очень малы: так, для никеля магнитострикционное удлинение составляет $40 - 10^{-6}$. Поэтому для увеличения амплитуды смещения и концентрации энергии колебаний, а также для передачи механических колебаний к месту сварки используют волноводы или концентраторы, которые в большинстве случаев имеют сужающуюся форму.

Ультразвуковая точечная сварка

Основной узел машины для выполнения точечных соединений с помощью ультразвука – магнитострикционный преобразователь (рис. 7.1).

Его обмотка питается током высокой частоты от ультразвукового генератора. Охлаждаемый водой магнитострикционный преобразователь 1 изготовлен из пермендюра (К49Ф2), он служит для превращения энергии тока высокой частоты в механические колебания, которые передаются волноводу 6. На конце волновода имеется рабочий выступ 4. При сварке изделие 8 зажимают между рабочим выступом 4 и механизмом нажатия 3, к которому прикладывают усилие, необходимое для создания давления в процессе сварки.

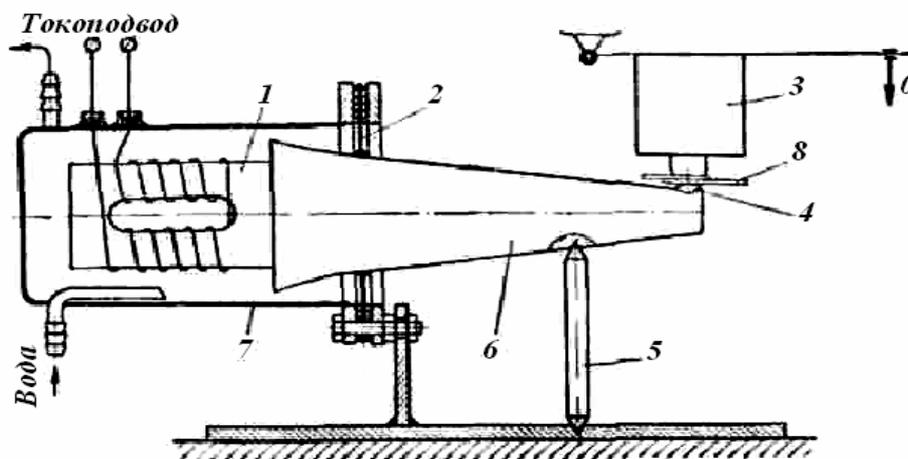


Рис. 7.1. Схема установки для точечной сварки ультразвуком:
 1 – магнитострикционный преобразователь; 2 – диафрагма;
 3 – механизм нажатия; 4 – выступ; 5 – маятниковая опора;
 6 – волновод; 7 – кожух водяного охлаждения; 8 – изделие

Сварка происходит при включенном преобразователе. Высокочастотные упругие колебания передаются через волновод на рабочий выступ 4 в виде горизонтальных механических перемещений высокой частоты. Длительность процесса сварки зависит от свариваемого металла и его толщины, для малых толщин она исчисляется долями секунды.

Ультразвуковая шовная сварка

Основные узлы машины для выполнения шовных соединений при помощи ультразвука (рис. 7.2): вращающийся магнитострикционный преобразователь 1 и волновод 2.

Конец волновода имеет форму ролика 3. Изделие 5, подлежащее соединению, зажимают между вращающимся роликом 3 волновода и холостым роликом 4. Высокочастотные упругие колебания передаются через волновод на ролик, который вращается вместе с волноводом. Изделие, зажатое между роликами, перемещается, и одновременно создается герметичное соединение.

Процесс ультразвуковой сварки происходит при воздействии сдвигающих высокочастотных колебаний, давления, приложенного перпендикулярно к поверхности листа, и теплового эффекта, сопровождающего процесс сварки. В результате в зоне сварной точки наблюдается небольшая пластическая деформация.

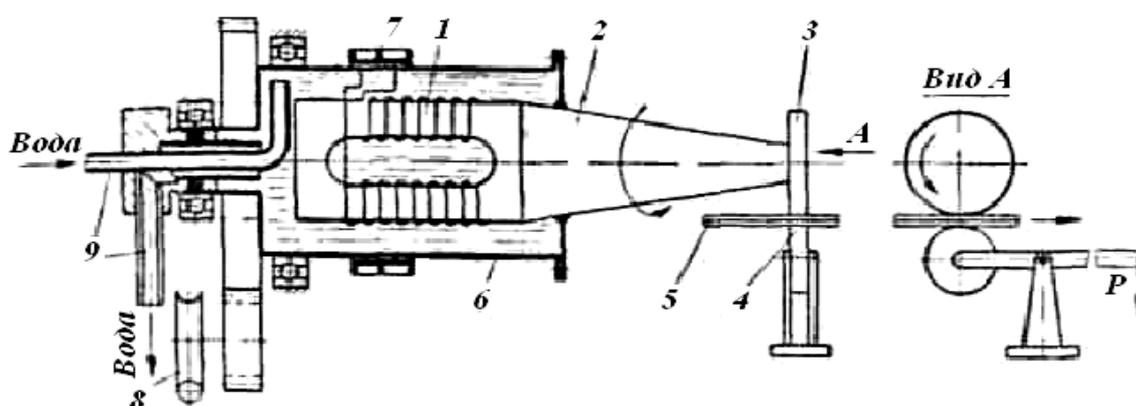


Рис. 7.2. Схема установки для роликовой сварки ультразвуком:

- 1 – магнитострикционный преобразователь; 2 – волновод;
- 3 – сваривающий ролик; 4 – прижимной ролик; 5 – изделие;
- 6 – кожух преобразователя; 7 – подвод тока от ультразвукового генератора;
- 8 – привод; 9 – подвод охлаждающей воды

Иными словами, процесс ультразвуковой сварки происходит под действием трения, вызванного микроскопическим возвратно-поступательным перемещением трущихся поверхностей.

В начальный момент действия ультразвуковых колебаний на свариваемых поверхностях возникает сухое трение, приводящее к разрушению окисных пленок и пленок из адсорбированных газов и жидкостей. После появления ювенильных поверхностей процесс сухого трения переходит в чистое трение, которое сопровождается образованием узлов схватывания. Схватыванию в значительной степени способствует малая амплитуда колебаний трущихся поверхностей и возвратно-поступательный характер этих колебаний.

7.2. Теплофизические свойства сварных соединений

Металлографические исследования образцов различных металлов, сваренных при повышенных давлениях, мощности и продолжительности, не обнаружили в зоне сварки литой структуры или воздействия на металл очень высоких температур.

Сварные соединения обладают прочностью, равной прочности основного металла.

Испытания на отрыв сварных соединений медных образцов показали высокий предел их прочности, около 20 кгс/мм² (196 МН/м²), близкий к пределу прочности основного металла. Высокие значения предела прочности ультразвуковых сварных соединений подтверждают то, что они образуются вследствие возникновения металлических связей в узлах схватывания, имеющих такую же прочность и природу, как и основной металл.

Процесс ультразвуковой сварки сопровождается выделением теплоты в зоне сварки, вызванной трением на контактных поверхностях и пластическими деформациями металла (табл. 7.1).

Таблица 7.1

Температура в зоне сварки

Металл	Толщина, мм	Режим сварки		Температура, °С
		продолжительность, с	усилие сжатия, кгс	
Алюминий	0,5+0,5	0,5	–	200 – 300
Медь	1,0+1,0	1,5	440	300 – 350
Цинк	0,85+0,85	0,6	220	100 – 150
Железо	0,4+0,4	0,4	260	800 – 900
Железо+константан	10,0+0,65	1,6	19	до 730
Медь+константан	0,3+0,65	1,0	40	» 450

Температура в зоне сварки зависит от прочностных характеристик, главным образом от твердости металла, его теплофизических свойств (теплопроводности и теплоемкости) и от режима сварки. Существует оптимальное давление, при котором развивается максимальная температура, дальнейшее увеличение давления приводит к увеличению скорости нарастания в начале сварки и уменьшению значения максимальной температуры (рис. 7.3, а).

Это вызвано уменьшением мощности, передаваемой в зону сварки вследствие выхода из резонанса колебательной системы, увеличением площади контакта в зоне сварки и т. п. Повышение температуры не является определяющим фактором, так как максимальная прочность сварных соединений достигается ранее, чем максимальная температура в контакте.

Предварительный подогрев изделия способствует уменьшению длительности пропускания ультразвуковых колебаний и увеличению прочности сварного соединения (рис. 7.3, б).

При малых давлениях прочность точки в значительной степени зависит от продолжительности прохождения ультразвука. С повышением давления сварные соединения прочнее при меньшей продолжительности прохождения ультразвука. При очень продолжительном пропускании ультразвука и большом давлении сварное соединение некачественно вследствие значительных деформаций основного металла и приваривания его к электроду. При шовной сварке прочность сварных соединений обычно выше прочности основного металла и разрушение происходит по основному металлу.

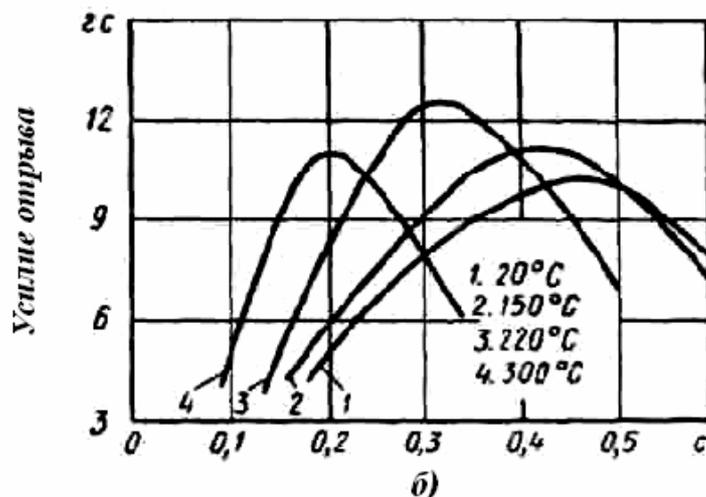


Рис. 7.3. Тепловыделение при ультразвуковой сварке:
 а – термические циклы при сварке алюминия толщиной 0,5+0,5 мм в зависимости от продолжительности пропускания ультразвука и усилия сжатия;
 б – влияние температуры подогрева на прочность соединений алюминиевых проводников диаметром 0,1 мм с алюминиевыми пленками ($f = 60$ кГц; $P = 0,2$ кгс; $A = 1,5$ мкм)

7.3. Области применения ультразвуковой сварки и применяемое оборудование

Сварка ультразвуком позволяет соединять различные металлы. Хорошо свариваются ультразвуком алюминий, медь, никель, удовлетворительно свариваются высоколегированные стали. При этом прочность сварных точечных соединений достаточно высока, разрушение соединений происходит обычно с вырывом точки по контуру как при испытаниях на срез, так и при испытаниях на отрыв.

С помощью ультразвука получены соединения на ряде тугоплавких металлов – ниобии, тантале, молибдене и вольфраме. Однако недостаток сварных соединений вольфрама и молибдена состоит в их хрупкости.

Ультразвуковая сварка нашла наибольшее применение в микроэлектронике, в основном для приварки токоотводов к интегральным схемам. Разработаны и выпускаются значительными сериями ультразвуковые машины для сварки различных элементов микросхем (табл. 7.2).

Таблица 7.2

Технические характеристики машин для сварки изделий микроэлектроники

Показатели	УЗС	УЗС-2	МС41П2-1	УЗСКН-1
Мощность, ВА	30	20	20	20
Частота, кГц	60	44	66	44
Усиление сжатия, кгс	До 0,5	До 0,5	0,02 – 0,250	0,02 – 1,0
Производительность (число точек в минуту)	–	–	20	800
Масса, кг	130	140	210	215

Машины оснащены автоматическими устройствами, позволяющими в значительной степени увеличивать их производительность: автоматизированы подача проводников, сварка, обрезка проводников и т. п.

Установки типа УЗС и УЗС-2 предназначены для присоединения круглых (диаметром 0,03 – 0,1) и плоских проводников толщиной до 0,1 мм из пластичных металлов (золота, алюминия) к тонким золотым, алюминиевым и медным пленкам, напыленным на диэлектрические подложки. Установки комплектуются ламповыми ультразвуковыми генераторами.

Полуавтомат МС41П2-1 предназначен для соединения деталей микросхем в круглых и плоских корпусах ультразвуковой сваркой золотыми и алюминиевыми проводниками диаметром 20 – 25 мкм.

Установка для ультразвуковой сварки с импульсным косвенным нагревом УЗСКН-1 предназначена для изготовления полупроводниковых приборов, тонкопленочных и полупроводниковых интегральных схем.

УЗСКН-1 можно приваривать круглые (диаметром 0,03 – 0,1 мм) и плоские (толщиной до 0,05 мм) проводники из алюминия, золота, меди к контакт-ным площадкам из золота, алюминия, меди, тантала, никеля, напыленных на диэлектрические полупроводниковые подложки.

В НИИЭСО разработан ряд ультразвуковых сварочных машин типа КТУ и МТУ (табл. 7.3).

Таблица 7.3

Технические характеристики машин типа МТУ и КТУ

Показатели	МТУ-0,4	МТУ-1,5	КТУ-1,5	МТУ-4
Мощность, кВт	0,4	1,5	1,5	4,0
Частота, кГц	22,0	22,0	22,0	18,0
Усилие сжатия, кгс	6—60	15—150	15—120	50—550
Толщина свариваемых металлов (медь), мм	0,01—0,2	0,1—0,5	0,1—0,5	0,3—1,2
Масса машины, кг	76	82	80	105

Примечание: производительность машин до 60 точек в минуту.

Акустический узел (рис. 7.4) этой серии машин состоит из резонирующего стержня со сварочным наконечником 1, концентратора с магнито-стрикционным преобразователем 2 с обмоткой. Диаметр контактной площади наконечника определяется технологическими требованиями к сварной точке.

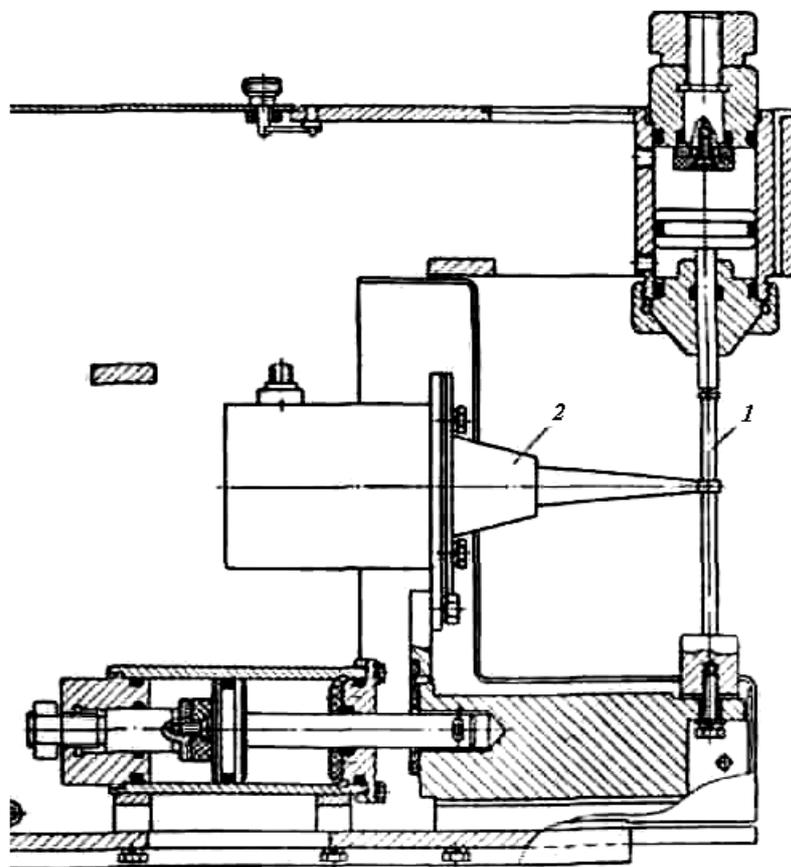


Рис. 7.4. Акустический узел машины МТУ-0,4

Сварочный наконечник изготовлен из высоколегированной стали, применение которой исключает налипание свариваемых металлов (медь, алюминий) на наконечник и не требует зачистки даже после сварки 5 – 20 тыс. точек. Усилие сжатия свариваемых деталей создается приводом давления. Акустический узел в горизонтальном направлении может перемещаться специальным приводом.

Принцип построения механической колебательной системы сварочной головки ультразвуковых сварочных клещей КТУ-1,5 (рис. 7.5) аналогичен системе, принятой в сварочных ультразвуковых машинах.

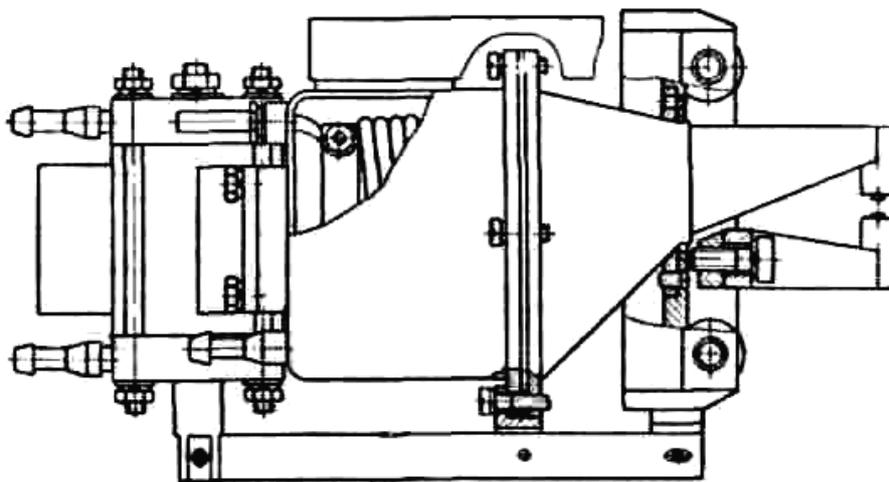


Рис. 7.5. Сварочная головка клещей КТУ-1,5

Перспективным считается использование этого метода при сварке металлов, образующих хрупкие интерметаллические соединения, для приварки тонких обшивок к несущей конструкции (в авиационной промышленности, автомобилестроении и ряде других отраслей промышленности).

Значительные успехи могут быть получены при воздействии ультразвука на жидкий металл в процессе сварки плавлением. Озвучивание металла приводит к раздроблению зерен, улучшению механических свойств.

7.4. Преимущества ультразвуковой сварки

Имеющийся опыт применения сварки ультразвуком выявил следующие *преимущества этого способа*:

- сварка ультразвуком происходит в твердом состоянии без существенного нагрева места сварки, что позволяет соединять химически активные металлы или пары металлов, склонные образовывать хрупкие интерметаллические соединения в зоне сварки;

- возможны соединения тонких и ультратонких деталей, приварка тонких листов и фольги к деталям неограниченной толщины, сварка пакетов из фольги;
- снижены требования к чистоте свариваемых поверхностей, в связи с чем возможна сварка плакированных и оксидированных поверхностей и вообще сварка металлических изделий, поверхности которых покрыты различными изоляционными пленками;
- небольшие сдавливающие усилия [10 – 250 кгс (98 – 2450 Н)] вызывают незначительную деформацию поверхности деталей в месте их соединения (вмятина, как правило, не превышает 5 – 10 %);
- применяется оборудование малой мощности и несложной конструкции (если, например, для контактной точечной сварки алюминия толщиной 1 мм необходима машина мощностью 100 – 150 кВт, то при сварке ультразвуком аналогичного соединения – всего 5 – 2,5 кВт);
- обработка ультразвуком сварных соединений после сварки приводит к уменьшению остаточных напряжений, снижению остаточных деформаций и предупреждает развитие деформаций с течением времени.

Ультразвуковая сварка нашла достаточно широкое применение для соединения тонких деталей из однородных и разнородных материалов в приборостроении и радиоэлектронной промышленности.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается сущность ультразвуковой сварки, и каковы ее разновидности?
2. Дайте характеристику ультразвуковой точечной сварки, приведите схему установки.
3. Дайте характеристику ультразвуковой шовной сварки, приведите схему установки.
4. Каковы теплофизические свойства соединений полученных ультразвуковой сваркой?
5. Покажите области применения ультразвуковой сварки и применяемое оборудование.
6. В чем заключаются преимущества ультразвуковой сварки?

8. СВАРКА ВЗРЫВОМ

8.1. Сущность процесса сварки взрывом

В последнее время в технике все более широкое распространение находит процесс сварки с использованием энергии взрыва.

Схема сварки металлов взрывом представлена на рис. 8.1.

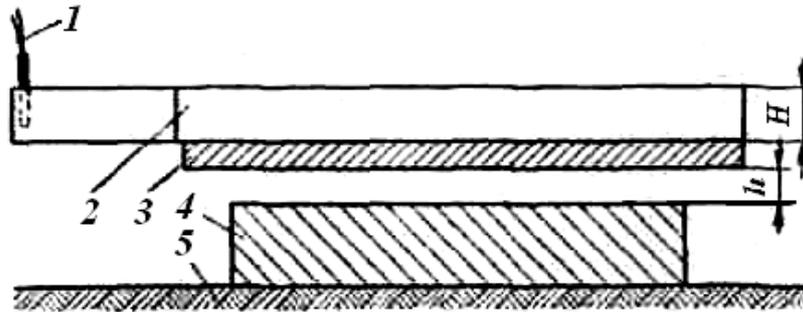


Рис. 8.1. Схема сварки взрывом плоских параллельно расположенных элементов

На жесткое основание 5 (земляной грунт, дерево, металл и т. п.) устанавливаются одна из свариваемых пластин 4. Вторую пластину 3 помещают над первой на расстоянии h от ее поверхности. На всю поверхность пластины 3 укладывают заряд 2 взрывчатого вещества (ВВ) слоем одинаковой толщины H . Заряд взрывают при помощи детонатора 1, находящегося в одном из концов или углов пластины 3. В качестве взрывчатого вещества используют гранулированные аммониты и гранулиты, имеющие плотность около $1,0 \text{ г/см}^3$ и скорости детонации D порядка 3 – 4 тыс. метров в секунду. Заряды ВВ взрывают с помощью электродетонаторов.

После инициирования заряда ВВ детонатором 1 вдоль слоя ВВ распространяется плоская детонационная волна. Позади фронта детонационной волны образуются продукты взрыва, которые в течение очень короткого промежутка времени по инерции сохраняют прежний объем, находясь под давлением 100 – 200 тыс. атм., а затем со скоростью $0,5 - 0,75 D$ разлетаются в стороны по нормальям к свободным поверхностям заряда. При этом они сообщают находящемуся за фронтом детонации участку металла импульс, под действием которого его элементарные объемы последовательно с ускорением движутся к поверхности неподвижной части металла с определенной скоростью и соударяются с ней.

При установившемся процессе сварки свариваемая пластина на некоторой длине дважды перегибается и, если соединяемые поверхности перед

сваркой были установлены параллельно друг другу, ее наклонный участок со скоростью v_k , равной D , движется за фронтом детонационной волны, а участок, на котором находится непродетонированная часть заряда ВВ, под действием сил инерции остается в исходном состоянии (рис. 8.2).

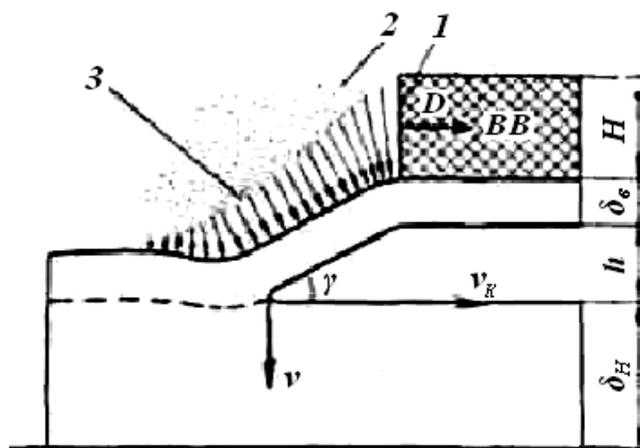


Рис. 8.2. Схема установившегося процесса соударения свариваемых пластин:

- 1 – фронт детонационной волны; 2 – фронт разлета продуктов взрыва ВВ;
 3 – фронт волны разрежения; D – скорость детонации ВВ; v – скорость соударения пластин; v_k – скорость перемещения динамического угла встречи соударяющихся пластин в направлении сварки; δ_e – толщина метаемой (верхней) пластины;
 δ_H – толщина неподвижной пластины; H – толщина слоя ВВ

Соударение свариваемых металлов, происходящее под некоторым углом γ , вызывает давление в десятки тысяч атмосфер. В местах прикосновения пластин появляется тангенциальная составляющая скорости соударения в направлении движения фронта детонационной волны, вследствие этого происходит совместное деформирование поверхностных слоев свариваемых листов. Такое деформирование имеет характер вязкого течения и способствует тесному сближению свариваемых поверхностей.

8.2. Физико-механические свойства соединений

Профиль деформированной зоны металла в образующемся сварном соединении обычно имеет волнообразный вид. Окисные пленки и другие поверхностные загрязнения дробятся и рассредоточиваются со слоями деформирующего металла аналогично явлению при холодной сварке и частично уносятся в виде тонкой пыли под действием кумулятивного эффекта. Исследования показали, что при сварке взрывом отсутствует зона, состоящая из смеси соединяемых металлов.

При сварке металлов взрывом происходит образование металлических связей по дислокационному механизму. Активация процесса образования металлических связей связана с интенсивностью совместной пластической деформации поверхностных слоев свариваемого металла, которая определяется скоростью распространения пластической деформации и ее величиной, а также величиной давления, развивающегося в зоне соударения.

Скорость пластической деформации металла в зоне соединения, протекающей вследствие перемещения имеющихся и образования новых дислокаций не может превышать скорости распространения в свариваемых металлах пластических волн сжатия c . Поэтому, для создания физического контакта и, таким образом, реализации механизма образования металлических связей скорость перемещения вершины угла встречи соударяющихся поверхностей v_K вдоль свариваемого соединения должна быть меньше величины c . При несоблюдении этого условия металл не деформируется, и сварка не происходит. Это требование выполняется путем подбора ВВ соответствующего типа, так как $D = v_K$.

Металл в зоне сварки подвергается неравномерному всестороннему сжатию; при этом имеется свободная поверхность в направлении процесса сварки. Чтобы в условиях сварки взрывом металл мог пластически деформироваться, давление во фронте пластической волны сжатия должно достигать определенной величины, связанной с прочностью металла (табл. 8.1).

Таблица 8.1

Минимальное давление, необходимое для сварки некоторых металлов

Металлы	Давление при сварке p , кгс/см ²	Предел текучести σ_T , кгс/см ²
Алюминий	6 300	300
Медь	24 600	1700
Сталь Ст3	60 000	2400

Металлографическое исследование полученных соединений показало, что упрочненные зоны образуются вследствие высокой степени деформации тонких поверхностных слоев свариваемых пластин.

При металлографическом исследовании структур соединений обнаружены следующие особенности строения микроструктуры:

- в соединении между сваренными материалами отсутствуют окисные пленки и другие неметаллические включения, обычно затрудняющие сварку металлов в твердой фазе. Это связано с уносом загрязнений с поверхностей пластин кумулятивной струей;

- граница соединений вдоль пластин представляет собой волнистую линию, а поперек пластин – почти прямую. Плоские поверхности

пластин превращаются в волнистые под действием тангенциальной составляющей скорости в точках соприкосновения пластин при соударении;

– малая продолжительность процесса сварки, которая длится микросекунды, даже при некотором повышении температуры поверхностных слоев металла, вызванном соударением и деформацией пластин, явно недостаточна для протекания диффузионных процессов. Вследствие этого в соединениях между разнородными металлами (Си + Ti; Fe + Al; Fe + Си) отсутствуют интерметаллические составляющие. Таким образом, сварка взрывом позволяет получать сварные соединения в твердой фазе без образования промежуточных химических составляющих между разнородными металлами и сплавами.

В практике для определения режимов сварки однородных или близких по физико-химическим свойствам металлов обычно достаточно ориентировочно выбрать скорость соударения v и давление p и сварить серию образцов с применением ВВ, скорость детонации D которого составляет 3000 – 4000 м/с. При этом от образца к образцу уменьшают или увеличивают скорость v , изменяя зазоры h между соударяющимися поверхностями. По результатам механических испытаний находят оптимальную скорость v .

Для определения режимов сварки разнородных металлов с большим различием физико-химических свойств (титан со сталью) проводят несколько серий опытов, варьируя величиной v_K , что дает возможность определить максимальное значение σ_g .

8.3. Особенности процесса сварки взрывом

Процесс сварки взрывом имеет ряд особенностей:

1. Сварное соединение образуется в течение миллионных долей секунды, т. е. практически мгновенно. Сварное соединение возникает вследствие образования металлических связей при совместном пластическом деформировании свариваемых поверхностей металла. Малая продолжительность сварки предотвращает возникновение диффузионных процессов. Эта особенность процесса позволяет сваривать металлы, которые при обычных процессах сварки с расплавлением металлов образуют хрупкие интерметаллические соединения, делающими непригодными швы к эксплуатации.

2. При сварке взрывом можно получать соединения неограниченной площади. При этом процесс сварки осуществляется тем легче, чем больше отношение площади соединения к толщине метаемой части металла. Осуществлены соединения площадью 15 – 20 м².

На рис. 8.3, *a* – *д* представлены технологические схемы сварки взрывом: *a* – сварка трех- и многослойных плоских соединений одновременно одним зарядом ВВ; *б* – приварка двух наружных слоев к листу взрывом из одной точки двух зарядов ВВ; *в* – наружная облицовка цилиндрических тел кольцевым зарядом ВВ; *г* – сварка биметаллических цилиндрических заготовок переменного диаметра для изготовления из разнородных металлов бесступенчатых трубных переходников; *д* – приварка труб к трубным решеткам теплообменников.

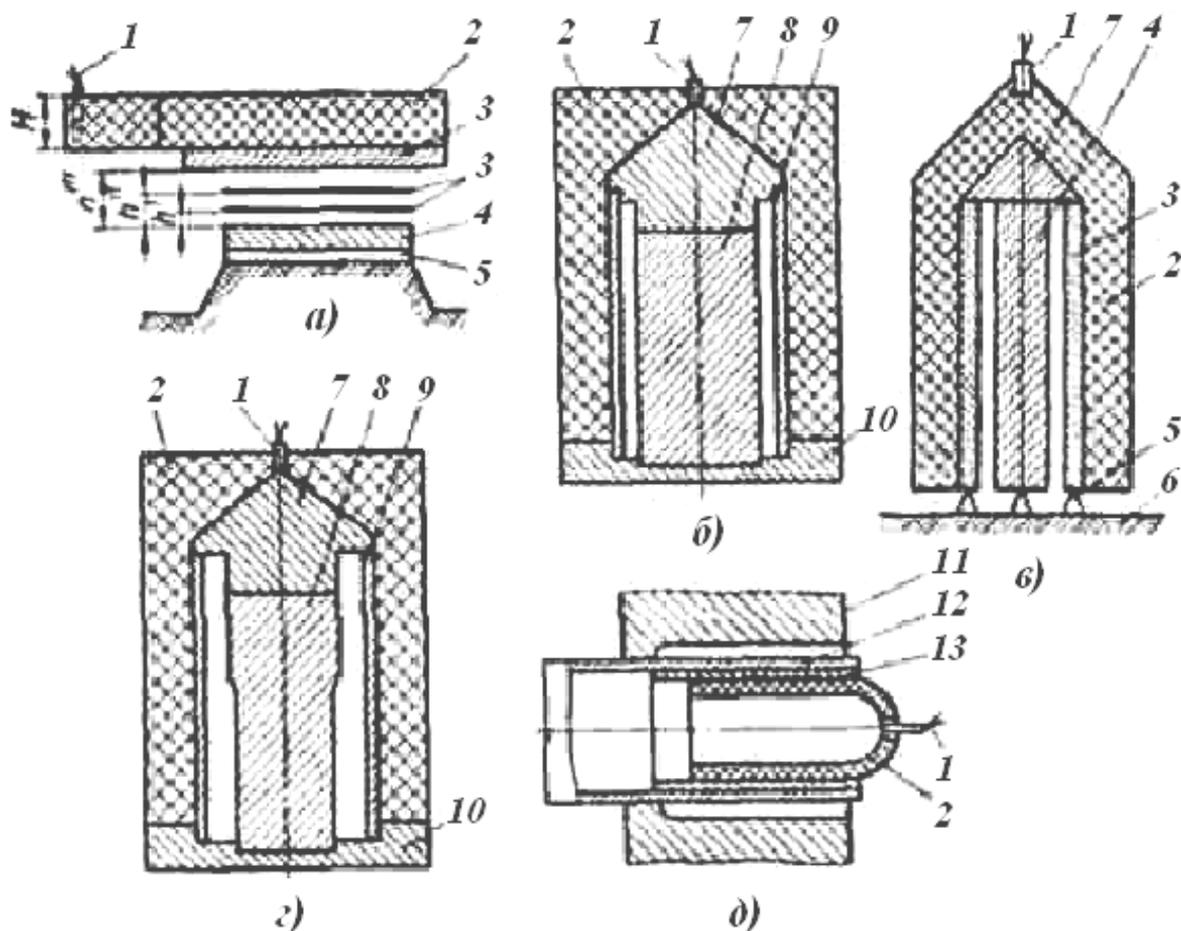


Рис. 8.3. Технологические схемы сварки взрывом соединений различного типа:
 1 – детонатор; 2 – заряд ВВ; 3 – метаемые пластины; 4 – неподвижная пластина;
 5 – подложка; б – грунт; 7 – металлическая призма или конус для центрирования
 заготовок и направления фронта детонационной волны; 8 – облицовываемый цилиндр;
 9 – метаемая труба; 10 – центрирующая шайба; 11 – трубная решетка; 12 – трубка;
 13 – буферная пластмассовая цилиндрическая вставка

8.4. Подготовка изделий под сварку

Заготовки не должны иметь значительного прогиба. Допускается прогиб не более 2 – 3 мм на 1 м длины. Поверхности свариваемых металлов должны быть зачищены от металлического блеска, для титана и сталей аустенитного класса допускается травление свариваемых поверхностей. Непосредственно перед сваркой соединяемые поверхности обезжиривают, так как наличие следов масел препятствует образованию сварного соединения. Зазоры между плоскими свариваемыми заготовками обеспечивают с помощью проволочных штырей, для цилиндрических заготовок – использованием специально выточенных центрирующих конусов и шайб (рис. 8.3, в).

Для зарядов ВВ, обычно насыпных, из картона делают контейнеры заданных размеров.

Сварку осуществляют на открытых полигонах, если масса заряда достигает десятков и сотен килограммов, либо в специальных производственных помещениях в вакуумных камерах, если масса заряда ВВ не превышает нескольких килограммов. Использование вакуумных камер предотвращает разрушающее действие и даже звуковой эффект.

8.5. Области применения сварки взрывом

Сварка взрывом находит применение при соединении труб, приварке их к трубным доскам теплообменных аппаратов. К готовым изделиям приваривают различную арматуру, получают заготовки деталей и переходников из разнородных металлов и сплавов.

Сварка взрывом применяется для стыковых и нахлесточных соединений некоторых готовых элементов конструкций. Перспективно применение сварки взрывом для соединения армированных металлов и получение из порошков монолитных металлов и сплавов. Затруднение вызывает сварка малопластичных, хрупких металлов (чугун, высокопрочные титановые сплавы), разрушающихся при взрывном нагружении.

Разработка процесса сварки взрывом находится в начальной стадии, поэтому трудно определить области применения этого метода в будущем. Сварку взрывом используют при изготовлении заготовок для проката биметалла, при плакировке поверхностей конструкционных сталей металлами и сплавами с особыми физическими и химическими свойствами, а также при сварке заготовок и некоторых деталей из разнородных металлов. Перспективным представляется сочетание сварки взрывом со штамповкой и ковкой.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается сущность сварки взрывом?
2. Приведите схему сварки и поясните принцип ее работы.
3. Какими физико-механическими свойствами обладают сварные соединения, полученные сваркой взрывом?
4. Каковы характерные особенности процесса сварки взрывом?
5. Как производится подготовка изделий при сварке взрывом?
6. Назовите области применения сварки взрывом.

9. ДИФФУЗИОННАЯ СВАРКА

9.1. Сущность метода диффузионной сварки

Диффузионная сварка – разновидность сварки давлением – происходит за счет взаимной диффузии атомов контактирующих поверхностей при относительно длительном воздействии повышенной температуры и незначительной пластической деформации. Если процесс соединения протекает при наличии жидкой фазы, то потребность в давлении отпадает, поскольку происходит предварительное смачивание соединяемых поверхностей жидкой пленкой.

Сварку производят в специальных сварочных установках (рис. 9.1).

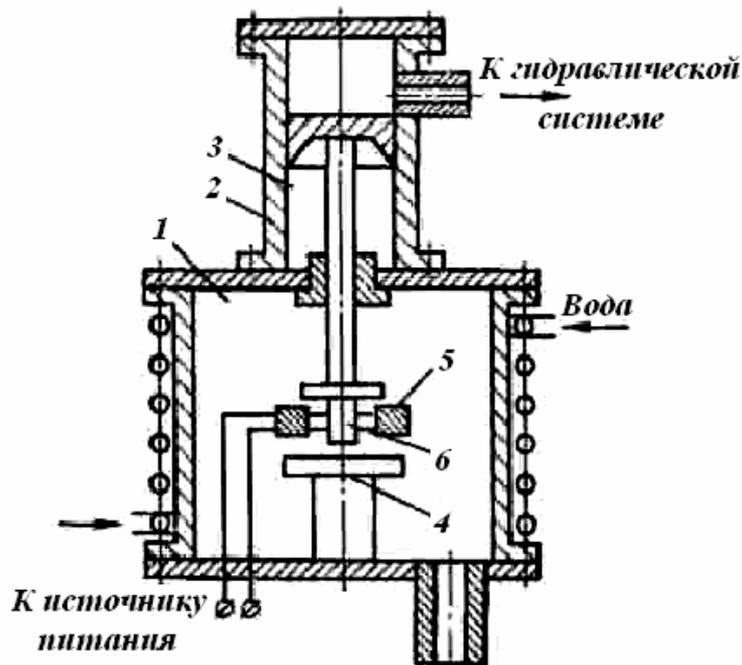


Рис. 9.1. Принципиальная схема установки для диффузионной сварки в вакууме:
1 – вакуумная камера; 2 – цилиндр гидропривода; 3 – поршень;
4 – стол для крепления деталей; 5 – индуктор; 6 – свариваемые детали

Две части детали помещают в вакуумную камеру. Для защиты их от интенсивного окисления и азотирования в процессе разогрева и сварки в рабочей камере обеспечивается вакуум. Источником нагрева служит высокочастотный генератор, сжимающее усилие обеспечивается гидросистемой. После сварки детали охлаждаются в вакуумной камере до комнатной температуры.

При этом способе сварки образование соединения зависит от температуры, давления и времени выдержки.

Температура сварки для однородных металлов, как правило, должна составлять 0,5 – 0,7 от температуры плавления металла или сплава, а при сварке разнородных – 0,5 – 0,7 от температуры плавления металлов с более низкой температурой плавления. Такая температура необходима для ускорения взаимной диффузии атомов материалов через поверхность стыка и для обеспечения некоторого размягчения металла, которое способствует более легкому протеканию деформации, смятию неровностей поверхности.

Давление служит одной главной цели – обеспечению плотного контакта поверхностей, подлежащих соединению. Величина давления должна быть достаточной, чтобы в результате деформации поверхностей соединяемых деталей все пустоты в области стыка были заполнены. Если давление недостаточно, то пустоты сохраняются, значительно снижая прочность соединения. При деформировании поверхностных слоев происходит разрушение поверхностных окислов, что обеспечивает контакт ювенильных поверхностей.

Время выдержки при заданных температуре и давлении в большинстве случаев должно быть минимальным, что обосновано как физико-механическими, так и экономическими соображениями. Для получения прочного соединения время сварки определяется установлением плотного контакта между соединяемыми поверхностями и минимальной диффузией атомов через поверхность соединения. Значительная диффузия может привести к образованию пустот в зоне соединения, а при сварке разнородных металлов и сплавов в ряде случаев к образованию интерметаллических фаз.

Диффузионная сварка наилучшим образом протекает при вакууме, не хуже при разрежении 10^{-2} мм рт. ст. или в атмосфере инертного газа; иногда применяют водород.

Для сварки необходим хороший контакт, поэтому поверхности изделий должны быть гладкими и плотно прилегать друг к другу.

Пластичные металлы (алюминий, медь, магний, олово и золото), которые легко деформируются, не требуют особой подготовки соединяемых поверхностей перед сваркой. Твердые материалы (твердые сплавы, тугоплавкие металлы, жаропрочные сплавы, инструментальная сталь и неметаллические материалы требуют особой обработки соединяемых поверхностей. В этом случае поверхность должна быть обработана по 6-му классу шероховатости.

9.2. Преимущества метода диффузионной сварки

Диффузионная сварка имеет ряд важных преимуществ по сравнению со сваркой и пайкой, среди которых можно выделить следующие:

– Высокое качество сварного соединения. При этом соединение сохраняет свойства, присущие свариваемым металлам и сплавам. При правильно выбранном режиме (температуре, давлении и времени сварки) металл соединения и прилегающих к нему зон имеет высокую прочность и пластичность. В сварном соединении отсутствуют непровары, поры, окисные включения и другие дефекты. Способ диффузионной сварки в вакууме не требует дорогостоящих припоев (золота, платины, серебра и т. п.), специальной проволоки, электродов и флюсов, а также защитных газов (аргона, гелия, водорода).

Постоянство качества соединений по таким показателям, как сопротивление разрыву, угол изгиба, ударная вязкость, вакуумная плотность и т. п. Колебания значений показателей не превышают 2 – 5 %. Это объясняется возможностью точно выдержать основные параметры процесса (температуру, давление и время сварки), а также тем, что свойства сварного соединения практически не зависят от таких факторов, как колебания напряжения в питающей сети, качество вспомогательных материалов, квалификация и степень утомляемости сварщика и т. п., которые имеют существенное значение при других видах сварки.

– Поскольку диффузионная сварка происходит при температуре 0,5 – 0,7 от температуры плавления металла в течение малого промежутка времени (1 – 5 мин), расход энергии и мощность, потребляемая на сварку в 4 – 6 раз меньше, чем, например, при контактной сварке.

– Диффузионная сварка гигиенична; отсутствуют ультрафиолетовое излучение, вредные газовые выделения, горячие брызги металла, мелкодисперсная пыль, что весьма важно для охраны здоровья работников.

– Основные параметры диффузионной сварки (температура, давление, вакуум и время сварки) легко программируются. Как правило, оборудование для диффузионной сварки, применяемое в промышленности, представляет собой либо полуавтоматы с минимальным использованием ручного труда, либо автоматы, работа которых протекает практически без участия человека.

– Диффузионная сварка позволила в 10 – 12 раз повысить срок службы, качество и надежность ряда изделий, разработать принципиально новые конструкции машин и приборов, упростить технологию и заменить дефицитные и дорогостоящие материалы.

Производственный опыт показал, что диффузионная сварка позволила создавать прочные соединения не только однородных, но и разнородных металлов и сплавов, в том числе и таких, теплофизические характеристики которых резко различны. Это, по-видимому, единственный надежный способ соединения материалов, малопластичных, тугоплавких, нерастворимых друг в друге или образующих между собой при сварке плавлением хрупкие интерметаллические соединения. С помощью диффузионной сварки получены соединения таких пар металлов и сплавов, выполнить которые другими видами сварки невозможно (например, титан с коррозионно-стойкой сталью, титан с алюминием, сталь с чугуном, медь с молибденом, вольфрам с ниобием и др.).

Стало возможным получение изделий таких форм, которые не могли быть получены ранее или стоимость производства которых обычными методами была слишком высокой. Допуски на размеры деталей, полученных диффузионной сваркой, в большинстве случаев не превышают допуски при механической обработке. Диффузионная сварка позволила получить детали очень сложной конструкции – пустотелые с несимметричной формой, со сложной кривизной – без использования крепежных элементов и сверления отверстий для их установки. Исключение большей части крепежных элементов уменьшает склонность конструкции к коррозии под напряжением для изделий с большим сроком службы.

Эти и другие преимущества данного способа сварки выдвигают его в число перспективных способов соединения металлических и неметаллических материалов.

Однако, как и всем существующим способам соединения, *диффузионной сварке свойственны недостатки:*

- дополнительные, но неизбежные затраты времени на операцию для откачки – вакуумирования рабочего объема камеры
- необходимость в хорошей подгонке и тщательной очистке соединяемых поверхностей.

9.3. Основные параметры и рекомендуемые режимы сварки

Процессом сварки можно управлять с помощью весьма простых приемов:

- температурой нагрева деталей;
- увеличением или уменьшением давления на поверхности контакта;
- понижением разрежения в рабочей камере;
- увеличением выдержки деталей при соответствующих температурах;
- различными способами подготовки соединяемых поверхностей и т. п.

Установление соотношений между этими параметрами процесса сварки имеет первостепенное значение для отработки оптимальной технологии.

9.3.1. Подготовка поверхности перед сваркой

Влияние способов подготовки свариваемых поверхностей на прочность соединений при диффузионной сварке исследовали экспериментально.

Сварку проводили при постоянных параметрах: $T = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$, $p = 2 \text{ кгс/мм}^2$ и $\tau = 5 \text{ мин}$.

Соединяемые поверхности обрабатывали следующими способами: черновое точение; тонкое получистовое точение; шлифование; полирование. Диаграмма, приведенная на рис. 9.2, показывает, что при черновой обработке прочность получается недостаточной.

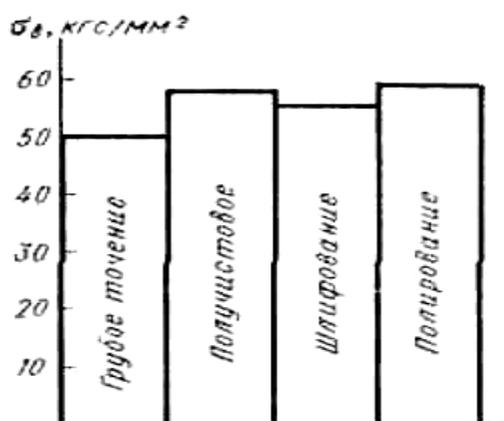


Рис. 9.2. Зависимость прочности соединения из стали 45 от механической обработки поверхности перед сваркой

При получистовом точении рельеф поверхности более гладкий, что позволило получить прочность соединения на 20 % выше. При шлифовании прочность соединения оказалась на 10 % меньше по сравнению с тонким получистовым точением. Возможно, при абразивной обработке на поверхность зачищенного металла попадали твердые частицы абразива, которые препятствовали диффузионным процессам.

Прочность соединения при полировании аналогична прочности при получистовом точении. Такое практическое совпадение величин прочности соединений служит хорошим доказательством того, что выбранный режим (температура, давление, длительность выдержки, разрежение) обеспечивает тесный контакт поверхностей заготовок уже при получистовом точении.

Перспективен способ очистки свариваемых поверхностей ультразвуком. Применение ультразвуковых колебаний для очистки свариваемых по-

верхностей повысило предел прочности сварных соединений при изгибе от 70 – 80 до 80 – 130 кгс/мм².

Последующая серия экспериментов была нацелена на определении прочности соединения в зависимости от способов удаления с поверхности металлов окисных и адсорбированных пленок (масел, жиров, пыли, грязи, краски и т. п.), мешающих сварке.

Жировые пленки удаляли различными способами: протиркой спиртом, ацетоном, бензином (калоша), четыреххлористым углеродом и нагревом в вакууме, травлением в кислотах.

Обезжиривание поверхности позволяет получить более высокую прочность, при обезжиривании четыреххлористым углеродом по сравнению с протиркой ацетоном прочность повышается на 14 % (рис. 9.3); установлено, что при диффузной сварке наблюдается очистка свариваемых поверхностей под действием нагрева в вакууме.

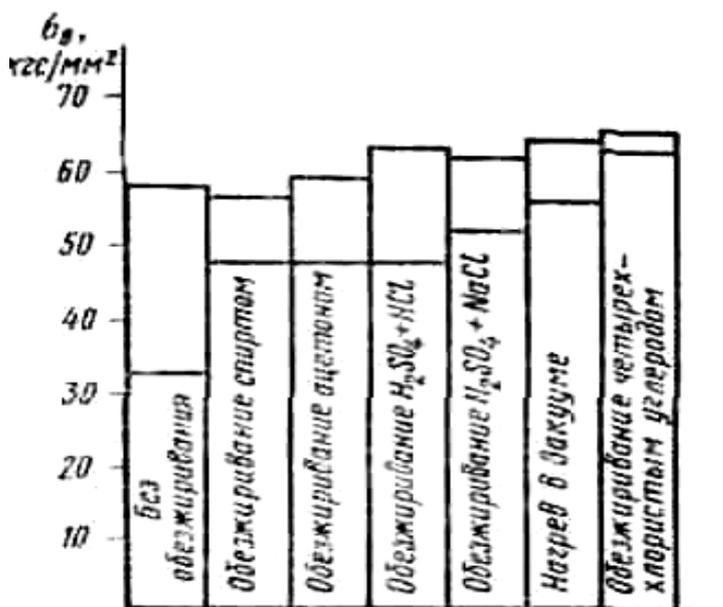


Рис. 9.3. Зависимость прочности сварного соединения от способа химической обработки поверхности

9.3.2. Температура и давление при сварке

Влияние температуры в диапазоне 800 – 1100° С на прочность соединения выяснялось при различных давлениях (0,5; 1; 2 и 5 кгс/мм²) и продолжительности сварки в 5 мин при разрежении 10⁻³ мм рт. ст. Из кривых, приведенных на рис. 9.4, следует, что прочность соединения при всех давлениях зависит от температуры.

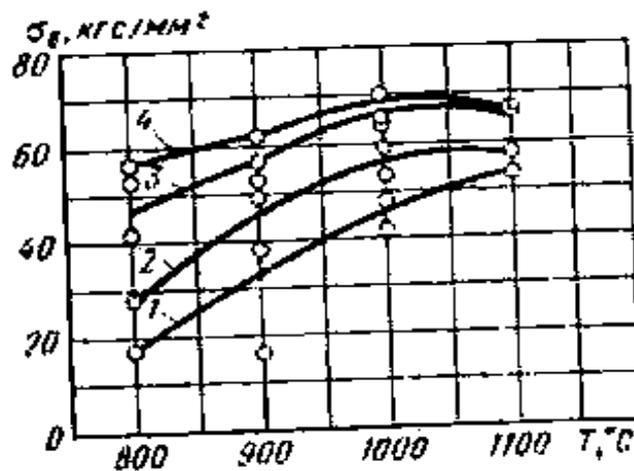


Рис. 9.4. Зависимость прочности сварного соединения от температуры сварки ($\tau = 5$ мин) при давлениях в процессе сварки: 1) – 0,5 кгс/мм²; 2) – 1 кгс/мм²; 3) – 2 кгс/мм²; 4) – 5 кгс/мм²

При давлении 2 и 5 кгс/мм² прочность соединения увеличивается лишь для температуры 1000 °С. При 1100 °С наблюдается даже некоторое уменьшение прочности соединения.

При увеличении давления (рис. 9.5) от 0,5 до 2 кгс/мм² прочность соединения значительно растет для температур 800, 900, 1000, 1100 °С.

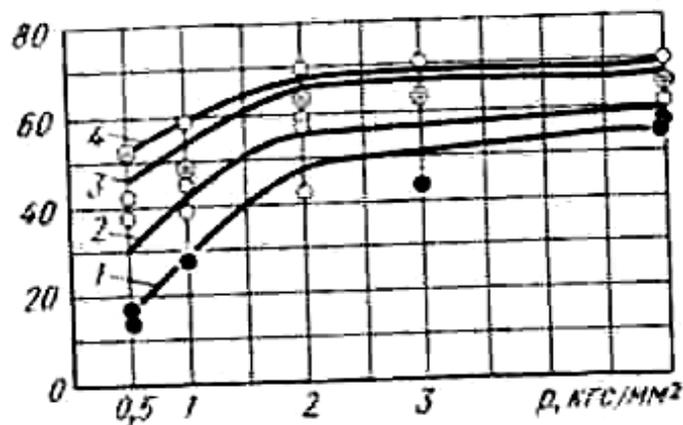


Рис. 9.5. Зависимость прочности соединения от давления и температуры сварки ($\tau = 5$ мин): 1) – $T = 800^\circ \text{C}$; 2) – $T = 900^\circ \text{C}$; 3) – $T = 1000^\circ \text{C}$; 4) – $T = 1100^\circ \text{C}$

Увеличение давления от 2 до 5 кгс/мм² сказывается незначительно на прочности соединения. Изменение прочности соединения при увеличении давления до 2 кгс/мм² можно объяснить увеличением площади истинного контакта между соединяемыми поверхностями.

9.3.3. Продолжительность сварки и охлаждения

Установлена зависимость прочности сварного соединения от времени сварки, с увеличением которого прочность сварного соединения растет до предела прочности основного металла (рис. 9.6).

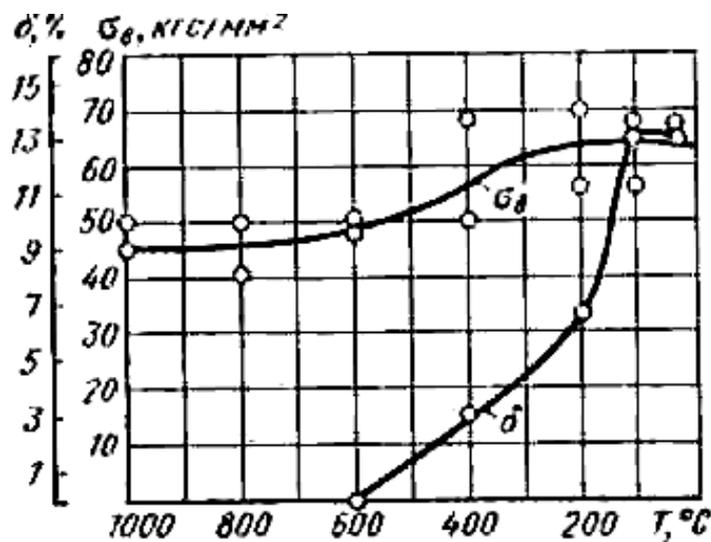


Рис. 9.6. Зависимость прочности и пластичности соединения из конструкционной стали от температуры охлаждения

Дальнейшее увеличение продолжительности сварки на прочность сварного соединения не влияет. Однако чрезмерное увеличение выдержки снижает прочность сварного соединения. Аналогичным образом влияет продолжительность процесса на относительное удлинение и ударную вязкость.

Влияние температуры охлаждения сваренных в вакууме образцов на прочность и пластичность изучали при $T = 1000$ °C, $p = 2$ кгс/мм², $\tau = 5$ мин.

При охлаждении на воздухе в интервале температур 1000 – 600 °C пластичность отсутствует. При понижении температуры до 200 °C пластичность повышается до 7 % и при температуре 100 °C и ниже она достигает максимума – 13 %. Таким образом, охлаждение в вакуумной камере под давлением сваренных образцов (деталей) обеспечивает необходимую прочность и пластичность соединяемых металлов и сплавов.

9.3.4. Вакуумирование при сварке

Исключительное значение для проведения процессов диффузионной сварки имеет степень разрежения. При этом следует учитывать некоторые особенности, в частности усиление газовыделения из деталей и стенок камеры при повышении температуры. Опыты проводили при $T = 900$ и 1000 °C, $p = 2$ кгс/мм², $\tau = 5$ мин.

Из кривых, построенных для стали 45, следует, что при 1000 °С прочность соединения значительно возрастает до степени разрежения 10^{-1} мм рт. ст.; при дальнейшем увеличении разрежения наблюдается увеличение прочности. При температуре 900 °С прочность соединения повышается до степени разрежения 10^{-2} мм рт. ст., дальнейшее повышение разрежения не оказывает столь большого влияния на прочность соединения (рис. 9.7).

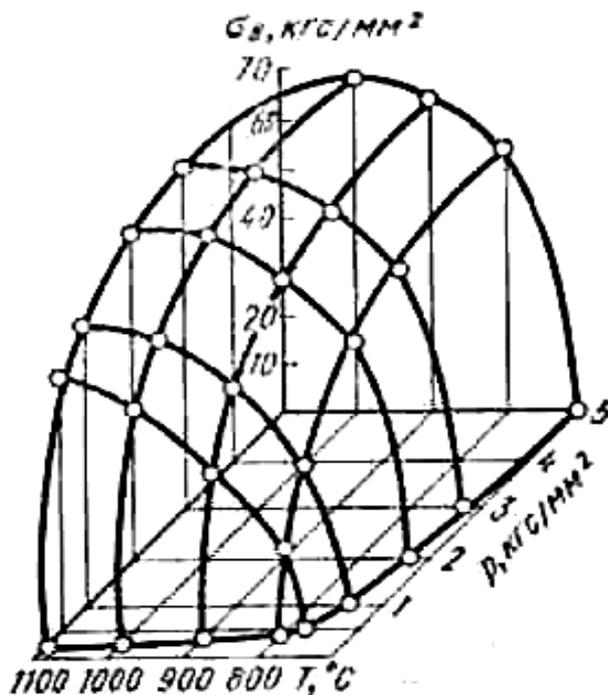


Рис. 9.7. Диаграмма объемной зависимости прочности соединения из стали 45 от температуры и степени разрежения

На основе расчетов и экспериментальной проверки установлено, что степень разрежения в вакуумной камере в диапазоне использованных режимов ($10^{-2} - 10^{-5}$ мм рт. ст.) вполне обеспечивает такую чистоту соединяемых поверхностей, которая гарантирует создание монолитного соединения, равнопрочного основному металлу.

9.3.5. Технология диффузионной сварки

С технологической точки зрения при выполнении диффузионной сварки важны следующие основные требования:

- должны быть обеспечены очистка поверхностей соединяемых материалов и непосредственный их контакт;
- материалы, подвергаемые соединению, следует нагреть до соответствующей температуры способствующей диффузии;
- защитная атмосфера должна предотвращать окисление или загрязнение материалов.

Оптимальное значение вакуума выбирают с учетом свойств свариваемых материалов и результатов исследований. При недостаточном вакууме усиливается окисление свариваемых материалов. Получение высокого вакуума существенно снижает производительность сварки, приводит к удорожанию процесса и может быть оправдано только с точки зрения эффективности очистки свариваемых поверхностей от окислов и различных газов.

Обработка поверхности должна обеспечить максимальную площадь контакта свариваемых поверхностей. При выборе класса шероховатости поверхности следует ориентироваться на технико-экономические возможности предприятия.

Способ очистки свариваемых поверхностей от пленок выбирают в зависимости от природы и вида пленок.

Температура сварки должна обеспечить большую скорость пластического деформирования и развитие диффузионных процессов. Температуру сварки определяют из соотношения $T_{св} = 0,7 T_{пл}$. Для жаропрочных сплавов и тугоплавких металлов она может быть несколько выше.

Давление должно достигать такой величины, чтобы осуществлялась деформация микронеровностей и шероховатостей на свариваемых поверхностях и обеспечивалась максимальная истинная площадь контакта последних. Ориентировочно оптимальное значение давления, обеспечивающего получение качественного соединения, не приводящего к макроскопической деформации зоны сварки, равно пределу упругопластической деформации свариваемых материалов при температуре сварки. При сварке разнородных материалов давление устанавливают в зависимости от характеристик менее прочного из свариваемых материалов.

В случае недостаточно интенсивной диффузии между компонентами соединяемых материалов при резко различных коэффициентах линейного расширения или при возможном появлении интерметаллидов, оказалось целесообразным применять промежуточную прокладку или подслоу в виде фольги, порошка и т. п.

С учетом сказанного, различают два способа диффузионной сварки:

1. Сварка без промежуточных прослоек.
2. Сварка с расплавляющейся прослойкой.

Время сварки выбирают, в зависимости от наличия промежуточной прослойки между свариваемыми поверхностями, опытным путем или расчетом по существующим методикам.

9.4. Значение диффузионной сварки и области ее применения

Способ диффузионной сварки имеет важное народнохозяйственное значение. Он позволил решить ряд сложных технических проблем, создать новые образцы современной техники, новые сложные и точные конструкции приборов и изделий различного назначения. В то же время диффузионное соединение является экономически эффективным технологическим процессом. Он не требует дорогостоящих припоев, специальной сварочной проволоки и электродов. В большинстве случаев отпадает необходимость в последующей механической обработке, отсутствуют дополнительные потери металла, вес конструкции не увеличивается, снижаются эксплуатационные расходы. Способ диффузионного соединения обеспечивает высокое качество изделий, повышает их надежность, позволяет увеличить ресурс работы.

С целью повышения коэффициента использования рабочего объема камеры периодического действия разработаны установки для сварки изделий – многокамерные (роторного типа), непрерывного действия с шлюзованием изделий, со специальными загрузочными бункерами. Разработаны установки с программным устройством, камерами, устанавливаемыми непосредственно на изделия, и др.

Диффузионной сваркой производится соединение сложных и точных конструкций аппаратов, плакированных серебром, для химической промышленности (высота 3 м, диаметр 1,8 м), металлокерамических гермоводов, узлов из феррита и металлокерамики, высокостойких штампов, упругих элементов датчиков, вольфрамовых сопел, многослойных панелей, модулей пневмоники, колес турбин радиального типа, лопаток турбин двигателей, пористых труб для химической и газовой промышленности, клапанов, гильз цилиндров двигателей и т. п.

Широкое применение нашла диффузионная сварка в электронной промышленности при изготовлении и сборке замедляющих систем, катодных ножек и других деталей и узлов электронных приборов. Технология обеспечила получение вакуумно-плотных, термостойких, вибропрочных сварных соединений при сохранении высокой точности геометрических размеров и форм изделий.

На ряде предприятий внедрены высокостойкие штампы для вырубки магнитопроводов электродвигателей, изготовленных диффузионной сваркой. Этот же способ позволяет успешно сваривать фольгу из никеля толщиной

3 мкм с массивной деталью, алюминиевую фольгу толщиной 8 мкм с решеткой из меди, т. е. толщины соединяемых материалов могут находиться в широких пределах – от микрометров (фольга) до нескольких метров.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается сущность диффузионной сварки?
2. Приведите принципиальную схему установки для диффузионной сварки в вакууме.
3. От каких факторов зависит образование сварного соединения при диффузионной сварке?
4. Какие преимущества и недостатки метода диффузионной сварки?
5. Какие параметры оказывают влияние на управление процессом диффузионной сварки в вакууме?
6. Приведите сравнительные характеристики подготовки поверхностей перед сваркой.
7. Как влияет температура и давление на процесс ведения диффузионной сварки?
8. Как влияет продолжительность сварки и охлаждение на прочность сварного соединения?
9. Какое значение для проведения процессов диффузионной сварки имеет степень разрежения?
10. Назовите основные технологические требования процесса диффузионной сварки.
11. Для каких изделий, и в каких областях промышленности используется диффузионная сварка в вакууме?

10. ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ СВАРКА

10.1. Сущность процесса

Сущность *высокочастотной сварки* состоит в нагреве до пластичного состояния соединяемых участков детали электрическими токами высокой частоты с последующим сжатием, обеспечивающим образование соединения.

Особенности нагрева токами высокой частоты:

1. Использование явления поверхностного эффекта, связанного с неравномерностью распределения тока по сечению проводника.

Сущность его можно представить следующим образом.

При протекании переменного электрического тока по проводнику вокруг него возникает переменное магнитное поле. Под воздействием этого поля значительно возрастает индуктивное сопротивление центральной части проводника и происходит вытеснение тока в периферийную часть (рис. 10.1, а).

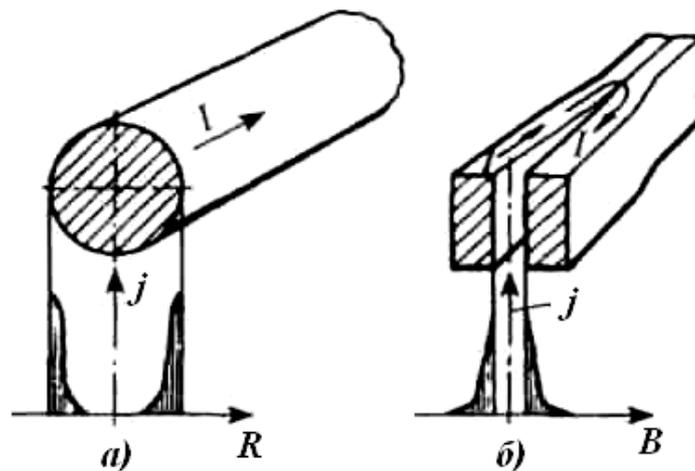


Рис. 10.1. Схема нагрева поверхности токами высокой частоты

С увеличением частоты тока неравномерность его распределения увеличивается и приводит к высокой плотности тока, а следовательно, и к высокой (до 80... 95 %) концентрации тепловой энергии в поверхностном слое проводника, в данном случае – свариваемой детали.

2. Заключается в эффекте близости, возникающем в результате взаимодействия магнитных полей токов, протекающих в близко расположенных проводниках. В зависимости от направления тока в зазоре между проводниками будет наблюдаться увеличение или уменьшение суммарной напряженности магнитного поля. Это также приводит к неравномерности распределения тока в проводниках. В случае противоположной направлен-

ности тока в заготовках (рис. 10.1, б) наибольшая плотность его будет в тех частях поверхности, которые обращены к другому проводнику.

Эффект близости совместно с поверхностным эффектом способствует высокой интенсивности нагрева поверхностного слоя свариваемой детали.

10.2. Преимущества применения высокочастотной сварки

Токи высокой частоты могут использоваться:

- а) от внешнего источника (машинные или электронные генераторы);
- б) возникать непосредственно в металле заготовки вследствие наведения в них ЭДС самоиндукции в переменном магнитном поле.

В последнем случае для создания в свариваемом изделии переменного магнитного поля необходимой конфигурации используют специальный инструмент – индуктор.

Преимущества способа:

- процесс может осуществляться в атмосфере, защитных газах, вакууме, с применением флюсов и т. п.;
- применение тока радиочастотного диапазона позволяет получить более высокую концентрацию энергии, и в 3 – 4 раза процесс менее энергоемкий по сравнению с контактной и дуговой сваркой;
- вследствие использования высококонцентрированного нагрева при высокочастотной сварке протяженность зоны термического влияния и зоны шва чрезвычайно мала и составляет 0,1 – 0,15 мм;
- в виду малой глубины проплавления, сварной шов обладает высокими механическими и антикоррозионными свойствами, весьма близкими к свойствам основного металла;
- применение высокочастотной сварки для изготовления труб из легированной стали позволяет получить скорости сварки, во много раз превышающие скорости при дуговой сварке;
- полученные соединения обладают высокой механической прочностью и отличаются стабильностью качества;
- как правило, процесс высокочастотной сварки полностью автоматизируется: параметры режима – сила тока, его частота, качество контакта, точность формовки и величины зазоров, а также давление осадки, скорость подачи заготовки – отслеживаются и корректируются следящими системами.

10.3. Области применения высокочастотной сварки

Высокочастотной сваркой могут свариваться стали, в том числе и высоколегированные, коррозионно-стойкие, медные и алюминиевые сплавы, высокоактивные металлы и сплавы, а также соединения из разнородных материалов толщиной 0,8... 14 мм.

Технологии высокочастотной сварки широко применяются в трубной промышленности:

1. Для контактной высокочастотной сварки продольного стыка труб с использованием эффекта близости (рис. 10.2).

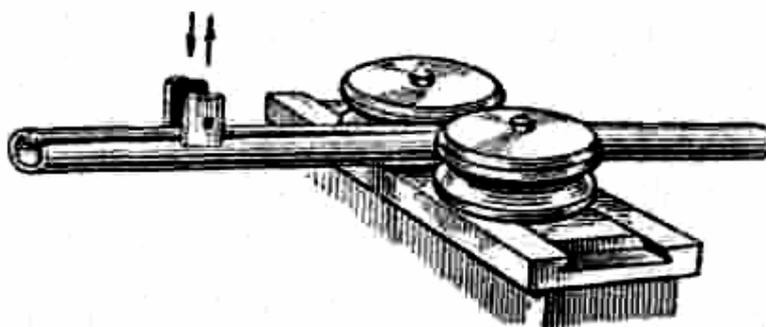


Рис. 10.2. Схема высокочастотной сварки продольного стыка трубы

Токоподводящие контакты, скользящие или вращающиеся, подводят ток высокой частоты к кромкам сформированной трубной заготовки. Вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости ток сосредоточивается на поверхностях сходящихся кромок. Трубная заготовка с разогретыми до необходимой температуры (1200... 1300 °С) кромками поступает в обжимные валки, где и происходит сварка. Вследствие большой интенсивности нагрева (8... 150)10 °С/с скорость сварки может достигать десятков и даже сотен метров в минуту, что значительно больше, чем при контактной, шовной или дуговой сварке.

Шунтирующее сопротивление при высокой частоте велико и, кроме того, его можно увеличить введением во внутреннюю полость трубы ферритового сердечника, увеличивая при этом концентрацию тока на поверхности трубы.

2. Для стыковой сварки труб и сплошных сечений, это позволяет нагревать торцы поверхностей без их контакта и оплавления. Кроме того, имеется возможность получить сварные соединения с незначительным внутренним гратом.

Торцы труб зажимают в специальных зажимах с усилием, исключая проскальзывание их при приложении осевого усилия (рис. 10.3).

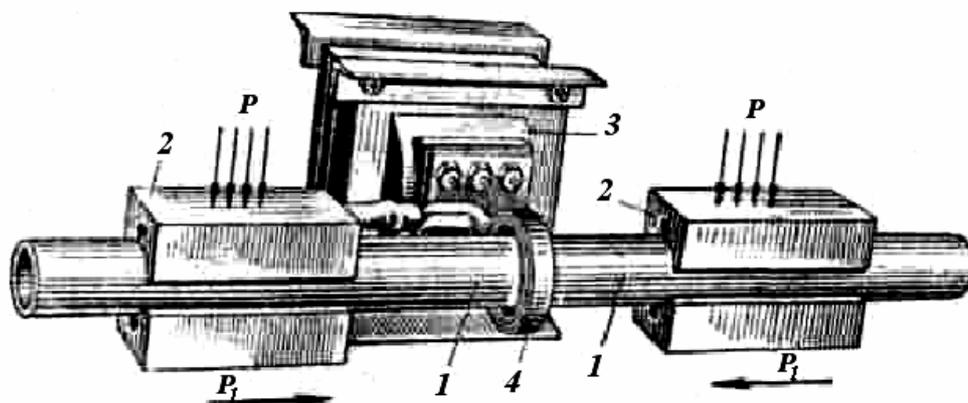


Рис. 10.3. Схема стыковой сварки труб:
1 – трубы; 2 – зажим; 3 – трансформатор; 4 – индуктор

Стык трубы помещают в одновитковый индуктор и нагревают до сварочной температуры, после чего прикладывают давление осадки.

Частоту тока, используемого для нагрева металла при стыковой сварке труб при индукционном нагреве, выбирают из условия получения возможно более высокого КПД индуктора и возможно большей скорости нагрева.

Критерием выбора частоты тока является диаметр d трубы и толщина ее стенки:

$$f \geq \frac{3000}{d^2}, \quad (10.1)$$

Глубина проникновения $\Delta_{г.пр}$ тока в металл, определяющая зону металла с максимальной температурой, т. е. толщину свариваемого металла, может быть получена из следующего выражения:

$$\Delta_{г.пр} = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}, \quad (10.2)$$

где ρ – удельное электросопротивление металла трубы, Ом·см;
 μ – относительная магнитная проницаемость.

3. Для наплавления твердых сплавов на режущие кромки различных инструментов.

На рис. 10.4 представлена схема армирования твердыми сплавами зубьев буровых долот.

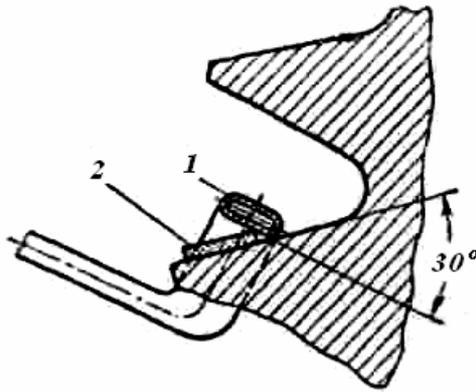


Рис. 10.4. Схема наплавки твердых сплавов на зубья буровых долот:
1 – индуктор; 2 – брикет твердого сплава

Твердый сплав в виде порошка или брикета укладывают на армируемую грань зуба и в таком виде нагревают ТВЧ. В процессе нагрева расплавляются брикет и металл зуба, при этом зерна твердого сплава проникают в основной металл на глубину 2 – 3 мм. Продолжительность наплавки одного зуба составляет 10 – 27 с.

Основные преимущества использования сварки с нагревом током высокой частоты в промышленности:

- возможна сварка труб из высокоактивных металлов, аустенитных и жаропрочных сталей и сплавов;
- прочность сварных соединений не уступает прочности основного металла;
- обеспечиваются высокая производительность и стабильность процесса;
- процесс нечувствителен к состоянию поверхности металла, легко механизуется и автоматизируется.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается сущность процесса высокочастотной сварки?
2. Каковы особенности нагрева проводника токами высокой частоты?
3. Преимущества применения высокочастотной сварки.
4. Назовите области применения высокочастотной сварки.
5. Приведите основные схемы применения высокочастотной сварки.
6. Основные преимущества процесса высокочастотной сварки?

РАЗДЕЛ 3. СПЕЦИАЛЬНЫЕ СПОСОБЫ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ

11. ДУГОВАЯ СВАРКА В КАМЕРАХ С КОНТРОЛИРУЕМОЙ АТМОСФЕРОЙ

11.1. Способы электродуговой сварки с защитой инертными газами

В промышленности многие металлы сваривают дугой с защитой места сварки инертными газами: *аргоном* или *гелием*.

Различают следующие способы защиты металлов от атмосферы при дуговой сварке в инертных газах:

1. С применением стандартных сварочных горелок для сварки в струе инертных газов.
2. С применением подвижных защитных микрокамер.
3. С использованием стационарных камер с контролируемой инертной атмосферой.

Самый распространенный и простой способ защиты ванны расплавленного металла от действия атмосферы – использование аргонодуговых горелок; в некоторых случаях применяют также защиту и нижней стороны соединяемых кромок.

Электродуговая сварка с защитой места сварки струей инертных газов широко применяется при изготовлении изделий:

- из высоколегированных сталей;
- алюминиевых и магниевых сплавов;
- сплавов на основе никеля.

Однако, как показывает практика, при сварке активных и тугоплавких металлов, а также при сварке листов большой толщины и поковок из высоколегированных сталей, алюминиевых и магниевых сплавов с использованием обычных сварочных горелок не обеспечивается необходимое качество сварочного соединения вследствие недостаточной защиты металла, нагретого до высоких температур.

Более совершенные методы сварки с защитой инертными газами – сварка с использованием защитных кожухов (микрокамер) и сварка с использованием стационарных камер с контролируемой инертной атмосферой.

11.2. Электродуговая сварка в защитной атмосфере с использованием микрокамер

Сварка с использованием защитных кожухов (микрокамер) представляет собой небольшие подвижные камеры, которые позволяют защитить не только ванну расплавленного металла, но и значительную область металла околошовной зоны, нагретого до высоких температур.

Размеры микрокамер и их форму выбирают в зависимости от вида свариваемого металла и его толщины, режимов сварки, формы изделия. Микрокамеры должны обеспечивать надежную защиту инертным газом зоны металла, нагретого до температур, при которых еще может происходить активное взаимодействие металла с кислородом и азотом воздуха.

При сварке циркония необходимо защищать зону металла с температурой выше $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ (773 K).

В подвижную камеру инертный газ подается через сопло и специальный газоподводящий шланг (рис. 11.1).

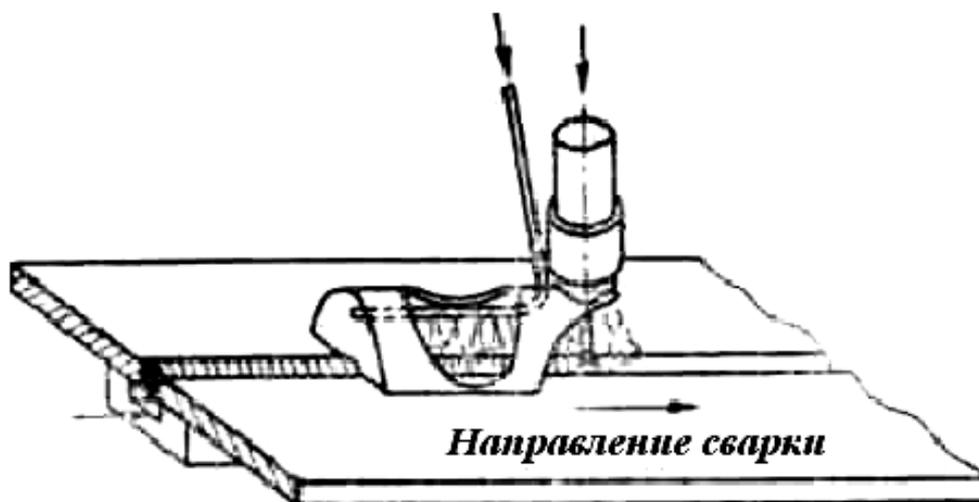


Рис. 11.1. Схема сварки горелкой с защитной подвижной микрокамерой

Корень шва защищен инертным газом, поступающим в подкладку, имеющую канавку. При сварке сосудов или труб оба конца изделия закрывают, а инертный газ непрерывно в процессе сварки подают внутрь изделия.

При сварке в микрокамерах для предупреждения подсоса воздуха инертные газы следует подавать с минимальной скоростью, обеспечивающей заполнение камеры с незначительным избыточным давлением.

Микрокамеры обычно имеют охлаждающие рубашки или трубки, по которым протекает вода. Кромки камер, соприкасающиеся с изделием, име-

ют небольшие отверстия, позволяющие защитному газу вытекать из-под камеры и тем самым препятствовать попаданию внешней атмосферы в камеру.

Сварка изделий с использованием микрокамер может осуществляться двумя способами:

1. Камера движется по изделию при неподвижном изделии.
2. Камера неподвижна, а изделие передвигается.

В обоих случаях камера прижимается к изделию с помощью пружин.

Применение защитных микрокамер, хотя несколько и улучшает технологический процесс, особенно при сварке изделий больших толщин и крупногабаритных изделий, но все-таки не гарантирует высокого качества сварных соединений, поскольку защита не совершенна ввиду возможности проникновения воздуха под камеру в процессе сварки изделия.

11.3. Электродуговая сварка в камерах с контролируемой атмосферой

Чтобы получить швы высокого качества, необходимо оборудование, обеспечивающее надежную защиту расплавленного металла от воздействия атмосферного воздуха – это герметичные камеры, заполненные инертным газом, в которых происходит сварка.

Преимущество такой камеры состоит в возможности создания атмосферы из инертных газов с минимальным содержанием кислорода и азота, а следовательно, в обеспечении более стабильных механических свойств сварного соединения.

В камерах с контролируемой атмосферой можно сваривать плавящимся и неплавящимся электродами вручную или же автоматами. В камере для ручной сварки могут работать одновременно два сварщика, для чего в камере имеется две пары отверстий с резиновыми перчатками.

Подготовка камеры к сварке заключается в следующем:

- свариваемые изделия устанавливают в камере, куда также загружают электроды и присадочную проволоку;
- после загрузки камеры загрузочные люки и отверстия для перчаток герметизируют;
- в камере с помощью вакуумных насосов создается вакуум 10^{-4} мм рт. ст. (133×10^{-4} Н/м²);
- для ускорения дегазации стенок камеры в процессе откачки камера может быть снабжена водяной рубашкой, по которой циркулирует горячая вода;

- для предохранения резиновых перчаток от разрыва воздух откачивают с наружной стороны люков, перекрывающих отверстия с перчатками;
- после откачки камеру заполняют аргоном или гелием до давления, равного атмосферному;
- давление в камере контролируют по мановакуумметру.

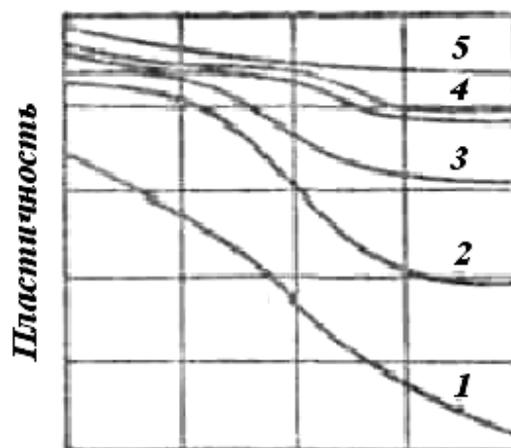
При сварке в камерах питание дуги осуществляется от источника постоянного тока или трансформатора с конденсаторной батареей. Для возбуждения дуги применяют осцилляторы. При сварке используют постоянный ток прямой полярности или переменный ток. При сварке плавящимся электродом используют и обратную полярность. Сварку в камере проводят без подачи инертного газа в горелку на тех же режимах, что и при сварке в инертных газах на воздухе. При ручной сварке в таких камерах трудность ведения процесса заключается в том, что избыточное давление, создающееся в камере вследствие нагревания газа, стремится вытолкнуть из камеры руки сварщика. Для предупреждения этого явления необходимо часть газа выпускать в процессе сварки.

О надежности газовой защиты в процессе сварки и при последующем охлаждении сварного соединения можно судить до некоторой степени по внешнему виду шва. Блестящая серебристая поверхность шва свидетельствует о хорошей защите. Появление на шве и в околошовной зоне цветов побежалости, налетов и т. п. указывает на плохую защиту металла.

Критерием оценки степени загрязнения металла шва азотом и кислородом служит твердость металла шва. При хорошей защите твердость металла шва не превосходит исходной твердости основного металла. Иногда для получения более чистой инертной атмосферы перед сваркой изделия в камере сваривают образцы из активных металлов (титана, циркония).

Об эффективности защиты металла при обычной сварке горелками, при сварке с использованием защитных кожухов и в камерах с контролируемой атмосферой можно судить по графику на рис. 11.2.

При сварке в камерах с контролируемой атмосферой пластичность металла сварного соединения приближается к пластичности основного металла. Автоматическая дуговая сварка в камерах с контролируемой атмосферой обеспечивает более стабильные качества сварных соединений, чем ручная.



Предел прочности основного металла

Рис. 11.2. Влияние способов защиты на пластичность шва: при аргонно-дуговой сварке сплавов титана различной прочности: 1 – обычная аргонно-дуговая сварка; 2 – сварка с защитой корня шва; 3 – сварка в кожухах; 4 – сварка в камере с контролируемой атмосферой; 5 – основной металл

Контрольные вопросы

1. Какие существуют способы защиты металлов от атмосферы при дуговой сварке в инертных газах?
2. Для каких металлов применяется электродуговая сварка с защитой места сварки струей инертного газа?
3. Какие инертные газы применяются для защиты ванны жидкого металла от атмосферного влияния?
4. Что представляет собой электродуговая сварка в защитной атмосфере с использованием микрокамер? Дайте характеристику двум способам сварки.
5. Как осуществляется электродуговая сварка в камерах с контролируемой атмосферой?
6. В чем заключается подготовка камеры к сварке?
7. Что служит критерием оценки степени загрязнения металла шва азотом и кислородом, и какова его сущность?

12. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА

12.1. Сущность электронно-лучевой сварки

Сущность процесса **сварки электронным лучом в вакууме** состоит в использовании кинетической энергии электронов, быстро движущихся в глубоком вакууме.

При бомбардировке электронами поверхности металла подавляющая часть кинетической энергии электронов (99 %) превращается в тепло, которое и используется для расплавления металла. Температура в месте соударения может достигать 5000... 6000 °С.

При использовании этого источника тепла для сварки необходимо получить свободные электроны, сконцентрировать и сообщить им большую скорость с целью увеличения их энергии, которая должна превратиться в тепло при торможении электронов в свариваемом металле.

Получение свободных электронов достигается применением раскаленного металлического катода, эмитирующего электроны. Ускорение электронов обеспечивается электрическим полем с высоким потенциалом между катодом и анодом.

Фокусировка – концентрация электронов – достигается использованием магнитных полей. Резкое торможение электронного потока происходит автоматически при внедрении электронов в металл.

Принципиальная схема установки для сварки электронным лучом показана на рис. 12.1.

Электронная пушка представляет собой устройство, с помощью которого получают узкие электронные пучки с большой плотностью энергии.

Пушка имеет катод 1, который может нагреваться до высоких температур. Катод размещается внутри прикатодного электрода 2. На некотором удалении от катода находится ускоряющий электрод (анод) 3 с отверстием. Прикатодный и ускоряющий электроды имеют форму, обеспечивающую такое строение электрического поля между ними, которое фокусирует электроны в пучок с диаметром, равным диаметру отверстия в аноде. Положительный потенциал ускоряющего электрода может достигать нескольких десятков тысяч вольт, поэтому электроны, эмитированные катодом на пути к аноду, приобретают значительную скорость и энергию.

После ускоряющего электрода электроны движутся равномерно. Пушка получает питание электрической энергией от высоковольтного источника постоянного тока. Электроны, имея одинаковый заряд, отталки-

ваются друг от друга, вследствие чего диаметр пучка увеличивается, а плотность энергии в пучке уменьшается.

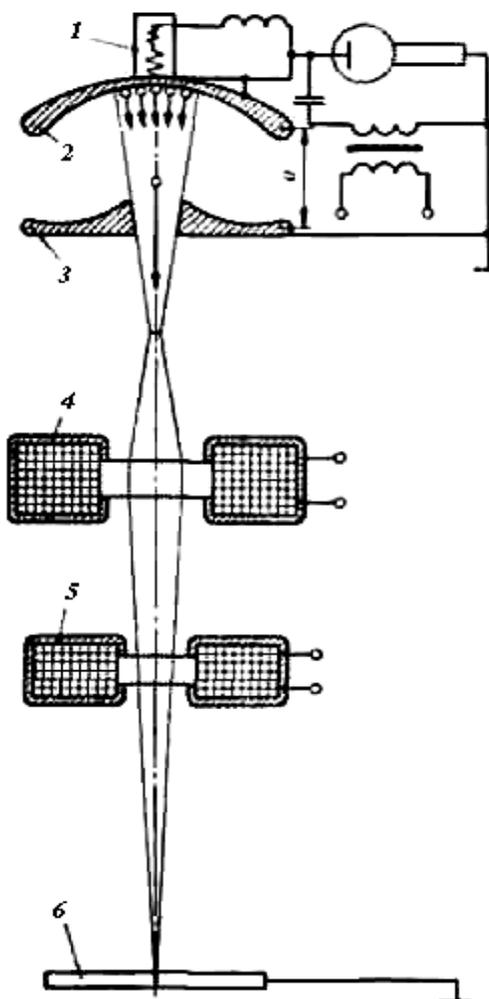


Рис. 12.1. Схема установки для сварки электронным лучом:
1 – катод; 2 – прикатодный электрод; 3 – анод; 4 – магнитная линза;
5 – магнитная отклоняющая система; 6 – изделие

Для увеличения плотности энергии в луче после выхода электронов из первого анода электроны фокусируются магнитным полем в специальной магнитной линзе 4. Сфокусированные в плотный пучок летящие электроны ударяются с большой скоростью о малую, резко ограниченную площадку на изделии 6, при этом кинетическая энергия электронов, вследствие торможения в веществе, превращается в теплоту, нагревая металл до очень высоких температур.

Для перемещения луча по свариваемому изделию на пути электронов помещают магнитную отклоняющую систему 5, позволяющую устанавливать электронный луч точно по линии сварки.

Для обеспечения свободного движения электронов от катода к аноду и далее к изделию, для тепловой и химической изоляции катода, а также для предотвращения возможности возникновения дугового разряда между электродами в установке создается глубокий вакуум порядка 10^{-4} мм рт. ст., обеспечиваемый насосной системой установки.

Движение электронов в вакууме не сопровождается световыми эффектами и поэтому луч не виден, но его действие на вещество можно наблюдать по нагреву места бомбардировки, свечению люминофоров и т. п.

12.2. Основные физико-механические характеристики сварки

Плотность энергии в источнике нагрева определяет его эффективный коэффициент использования теплоты, форму провара, размеры зоны термического влияния и другие параметры. Электронный луч – наиболее эффективный источник нагрева металла при сварке, поскольку плотность энергии в луче не более чем на два порядка превосходит плотность энергии электрической сварочной дуги.

На рис. 12.2 по оси абсцисс отложены диаметры (d_0) эффективных пятен нагрева, характеризующие возможность использования источника теплоты для сварки микроизделий.

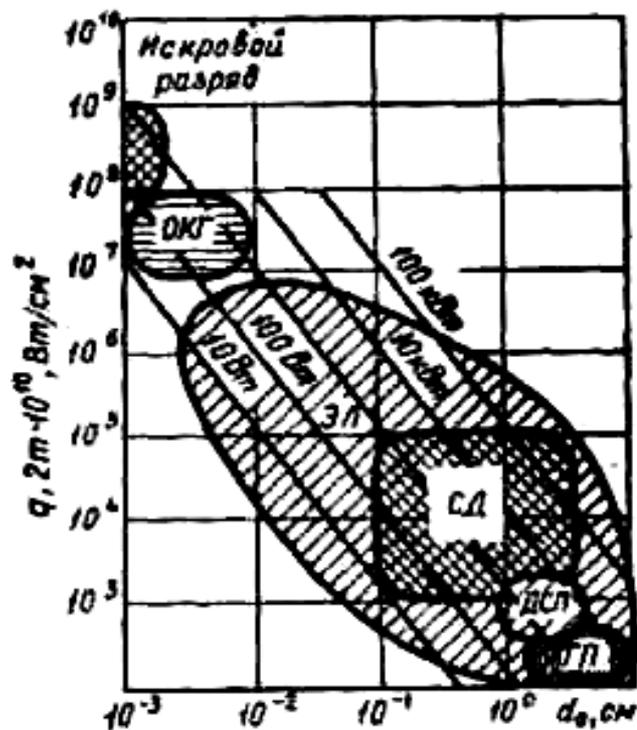


Рис. 12.2. Плотность энергии и диаметр пятна нагрева для различных источников теплоты: ГП – газовое пламя; ДПС – дуговая плазма; СД – сварочная дуга; ЭЛ – электронный луч; ОКГ – оптический квантовый генератор

По оси ординат отложена максимальная плотность энергии q , которая может быть достигнута в источнике теплоты. Наклонными линиями показана мощность источника, изменяющаяся от нескольких до сотен киловатт. Из рис. 12.2 следует, что электронный луч как источник теплоты обладает свойствами, позволяющими использовать его для самых плавных нагревов и как источник, сосредоточенность которого на два порядка выше, чем у сварочной дуги (табл. 12.1).

Таблица 12.1

**Плотность энергии различных источников теплоты
и минимальная площадь пятна нагрева**

Источник теплоты	Минимальная площадь пятна нагрева, см ²	Максимальная плотность энергии, Вт/см ²
Ацетилено-кислородное пламя	10^{-2}	$5 \cdot 10^4$
Сварочная дуга	10^{-3}	$1 \cdot 10^5$
Электронный луч	10^{-7}	$5 \cdot 10^8$
Луч оптического квантового генератора	10^{-7}	$5 \cdot 10^8$

Электронный луч также может быть сосредоточен на очень малой площади, что дает возможность использовать его для сварки изделий микроэлектроники.

Мощность электронного луча может достигать очень больших величин, это делает его перспективным для сварки больших толщин (200 – 500 мм).

Можно получить электронный луч с интенсивностью $5 \cdot 10^8$ Вт/см². Плотность энергии в таком луче достигает 500 000 кВт/см², т. е. на одном квадратном сантиметре с помощью электронного луча может быть сосредоточена энергия мощной современной турбины.

Применительно к сварочным целям интенсивность энергии в электронном луче должна иметь свой оптимум, так как при очень высокой сосредоточенности источника теплоты процесс сопровождается не только плавлением, но и интенсивным испарением металла, вследствие чего происходит процесс резания металла. На этом принципе построены электронные пушки, предназначенные для сверления и фрезерования.

Высокая интенсивность таких источников теплоты позволяет сваривать любые металлы. Плотность энергии в электронных пучках, используемых для сварки, определяется рядом факторов: свойствами металла (температура плавления, теплопроводность и др.), его толщиной, формой сварного соединения и т. д. При сварке тугоплавких и теплопроводных металлов и металлов больших толщин целесообразно применять электронный луч с более высокой плотностью энергии. При сварке легкоплавких

и легкоиспаряющихся металлов и металлов малых толщин целесообразно использовать лучи с относительно малой плотностью энергии, а в ряде случаев с импульсным нагревом.

На рис. 12.3, *а* показаны макрошлифы, на которых видно изменение формы и размеров зоны проплавления при сварке электронным лучом различной мощности при разгоняющем напряжении 70 кВ.

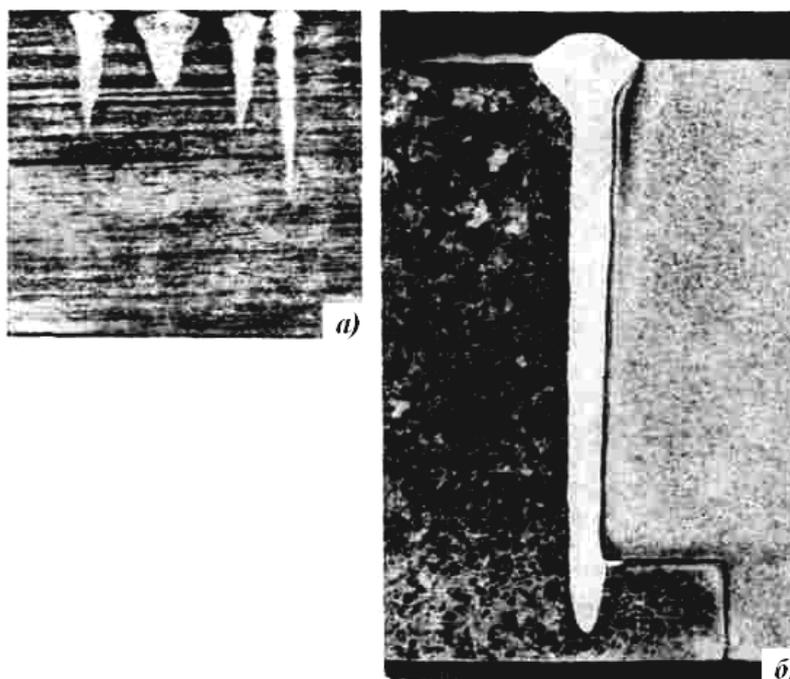


Рис. 12.3. Макрошлиф сварного соединения

При использовании электронного луча, обладающего большой плотностью энергии, обнаруживается ярко выраженное направленное тепловое воздействие. Зона расплавления в металле вытягивается преимущественно в направлении действия электронного луча. При дальнейшем повышении мощности зона проплавления принимает форму конуса с отношением глубины шва h к ширине проплавления B , достигающим 10 – 15. На рис. 12.3, *б* показан макрошлиф поперечного сечения соединения из стали различных марок, выполненного электронно-лучевой сваркой.

Форма зоны проплавления при сварке электронным лучом металла большой толщины выгодно отличается от формы проплавления при сварке дугой за счет резкого увеличения глубины. Возможность получения швов с большой глубиной проплавления – одно из основных преимуществ электронно-лучевой сварки, использующей источник теплоты с высокой плотностью энергии.

Характерной особенностью сварки электронным лучом является возможность получения сварных соединений при минимальных затратах энергии на расплавление металла.

При электронно-лучевой сварке требуется в 10 – 15 раз меньше энергии, чем при дуговой.

На рис. 12.4 приведен макрошлиф, иллюстрирующий соотношение площадей зон проплавления, полученных при дуговой и электронно-лучевой сварке. Из макрошлифа следует, что площадь зоны проплавления при электронно-лучевой сварке примерно в 25 раз меньше, чем при дуговой.

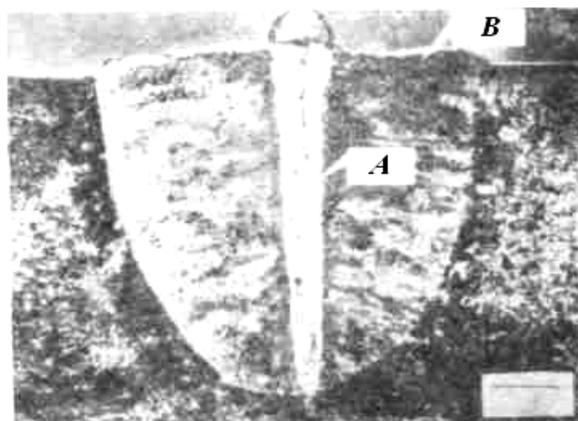


Рис. 12.4. Зона проплавления при аргоно-дуговой *B* и электронно-лучевой *A*

Основные преимущества электронно-лучевой сварки

1. Высокая концентрация энергии в луче обеспечивает получение швов не только с минимальной зоной расплавленного металла, но и соединений, металл которых в околошовной зоне не претерпевает значительных изменений вследствие ввода минимального количества тепла и значительных скоростей охлаждения.

2. Отсутствие значительной по протяженности зоны термического влияния исключает недостатки, возникающие при эксплуатации конструкций, вызванные изменением физико-механических свойств металла в околошовной зоне.

3. Глубокое проплавление металла при малой погонной энергии, имеющее место при сварке электронным лучом, обуславливает значительно большую скорость отвода тепла от зоны сварки, что обеспечивает увеличение скорости кристаллизации малой по объему сварочной ванны с получением мелкокристаллического строения металла шва, по своим свойствам мало отличающегося от основного металла.

4. Ввод значительно меньшего количества тепла, имеющего место при электронно-лучевой сварке, дает возможность во много раз уменьшить деформации изделий по сравнению с дуговым способом сварки.

5. Электронный луч является легко управляемым источником тепла при сварке, что позволяет в широких пределах и очень точно регулировать температуру нагрева изделия, легко перемещать зону нагрева по изделию и переносить энергию на значительные расстояния. Ранее было показано, что электронный луч является более интенсивным источником тепла по сравнению с известными источниками при сварке. Другой важной особенностью электронного луча является то, что плотность энергии в нем можно плавно изменять путем изменения напряженности магнитного поля фокусирующей линзы. Это дает возможность без особых затруднений нагревать изделия в более широком диапазоне температур, чем дугой или газовым пламенем.

6. Электронный луч является легко управляемым источником нагрева не только возможностью изменения его интенсивности, но и возможностью его перемещения по поверхности изделия.

7. Кроме передвижения электронного луча при помощи отклоняющих систем, появляется возможность изменять форму пятна нагрева за счет изменения очертания катода. При этом можно получить форму нагрева в виде круга, кольца и т. п., что дает возможность производить одновременный подогрев изделий, имеющих сложную форму сечений.

12.3. Области применения электронно-лучевой сварки

Малое поперечное сечение луча, перенос энергии на значительные расстояния, получение узких швов с малой площадью расплавленного металла обеспечивают возможность выполнения новых, более совершенных видов сварных соединений и повышают качество изделий.

Сварка электронным лучом расширяет область использования *сварных соединений с прорезными швами и электрозаклепами*. Этот вид швов впервые был применен при электродуговой сварке под флюсом.

Преимуществом прорезных швов и электрозаклепок является:

– возможность сварки конструкций, когда один из элементов конструкции недоступен для непосредственного воздействия дуги. В этом случае, используя глубокий провар, имеющий место при сварке под флюсом, можно получить сварные соединения путем проплавления одного из элементов конструкции. На рис. 12.5 показаны соединения, образуемые проплавными швами;

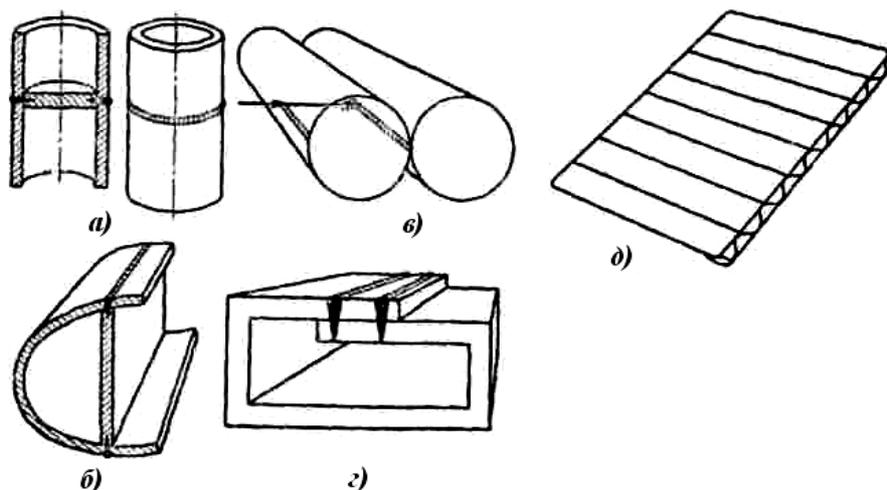


Рис. 12.5. Конструкции, выполненные проплавленными швами:
a, б — варка герметичных перегородок в трубы; *в* — сварка двух труб;
г — сварка листов; *д* — приварка гофрированной вставки к листам

– получение глубокого проплавления при электронно-лучевой сварке дает возможность выполнять принципиально новые, более совершенные виды соединений, сварка которых обычными методами невозможна.

На рис. 12.6 показаны конструкции, сваренные путем одновременного проплавления четырех (рис. 12.6, а) и трех (рис. 12.6, б) листов.

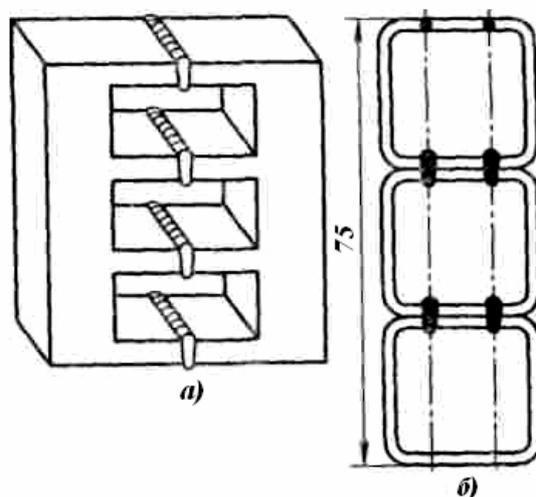


Рис. 12.6. Конструкции, выполненные одновременной сваркой
 трех и четырех стыков

– возможность осуществления таких соединений электронным лучом позволяет создавать конструкции, обладающие меньшим весом, большей прочностью, при этом значительно упрощается процесс изготовления изделий;

– большая концентрация энергии в малом поперечном сечении луча и возможность переноса энергии лучом на значительное расстояние от катода

(500 мм и больше) дают возможность использовать электронный луч при сварке в узких щелях, когда методы дуговой сварки не могут быть использованы;

– при сварке электронным лучом пятно нагрева можно переносить в вертикальной плоскости на значительные расстояния. Этот эффект можно использовать в случае необходимости производить сварку изделий, имеющих швы, расположенные в разных плоскостях, что может привести к значительному упрощению конструкции сварочных установок.

В Московском энергетическом институте разработана техника и технология электронно-лучевой сварки металла больших толщин с использованием низкого ускоряющего напряжения (до 60 кВ). Сваривались изделия из низколегированной стали марок 16ГНМА, 22К, ЭИ415, 34ХМ1А и др., широко используемой в энергомашиностроении. Детально изучены сварные соединения стали 16ГНМА толщиной 115 мм, из которой изготавлиются барабаны котлов высокого давления.

Получены также хорошие результаты электронно-лучевой сварки за один проход стали марок 22К, 34ХМ1А толщиной соответственно 105 и 90 мм.

Электронно-лучевая сварка также позволяет получать высококачественные соединения пароперегревательных труб мощных котлоагрегатов из стали марок 12Х18Н12Т и 12Х1МФ. Швы, выполненные электронно-лучевой сваркой, не имеют грата, а усиление шва менее 1 мм. Машинное время сварки одного стыка 20 с.

Электронно-лучевая сварка находит применение как для соединения малогабаритных изделий электроники и приборостроения, так и для соединения различных крупногабаритных изделий – длиной и диаметром в несколько метров.

12.4. Оборудование для электронно-лучевой сварки

Электронно-лучевая сварка в вакууме может быть осуществлена при наличии специального оборудования: сварочной вакуумной камеры с вакуумной насосной системой, электронной пушки с высоковольтным источником постоянного тока.

Вакуумная камера должна быть газонепроницаемой и достаточно прочной, чтобы выдержать наружное атмосферное давление. Обычно вакуумные камеры имеют вакуумные вводы для передачи вращательных или возвратно-поступательных движений, подачи охлаждающей воды, кроме того, необходимы вакуумные электрические вводы для подачи электрической энергии к катоду, магнитным линзам и т. п.

В вакуумных камерах обычно имеются люки, обеспечивающие загрузку изделий, механизмов и устройств, расположенных внутри камеры. Кроме загрузочных люков, имеются несколько смотровых люков для наблюдения за процессом сварки.

12.4.1. Сварочная электронно-лучевая установка

На рис. 12.7 показана сварочная электронно-лучевая установка.

Установка состоит из вакуумной камеры 1, в верхней части которой размещается электронная пушка 2, получающая питание электроэнергией от высоковольтного выпрямителя. Для фокусировки электронного луча и возможности управления лучом на пути его установлена электромагнитная фокусирующая линза и отклоняющая система 4. Внутри камеры может также находиться механизм перемещения изделия 5 с электродвигателем. Питание системы управления пушкой и электрического двигателя механизма перемещения осуществляется через электрический вакуумный ввод. Создание вакуума в камере осуществляется с помощью вакуумной системы. Управление всеми электрическими агрегатами осуществляется с пульта управления. Вакуумная камера выполнена в виде цилиндра. Для наблюдения за процессом сварки в камере и электронной пушке имеются несколько смотровых окон 3 и 6, изготовленных из свинцового стекла. Внутри камеры расположены приспособления для крепления изделия и механизм перемещения изделия под электронным лучом.

Наибольшее распространение в промышленности получили универсальные установки с многопозиционными сменными механизмами и сравнительно небольшими вакуумными камерами (длиной до 2 м и диаметром до 1 м). Установки этого типа имеют достаточно мощные вакуумные системы (обычно производительностью 1,0... 2,5 тыс. л/с при вакууме $1 \cdot 10^{-4}$ – $1 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.). Мощность электронно-лучевых пушек до 10 – 15 кВт.

Универсальный характер установок этого класса позволяет использовать их как в научно-исследовательских лабораториях, так и на промышленных предприятиях.

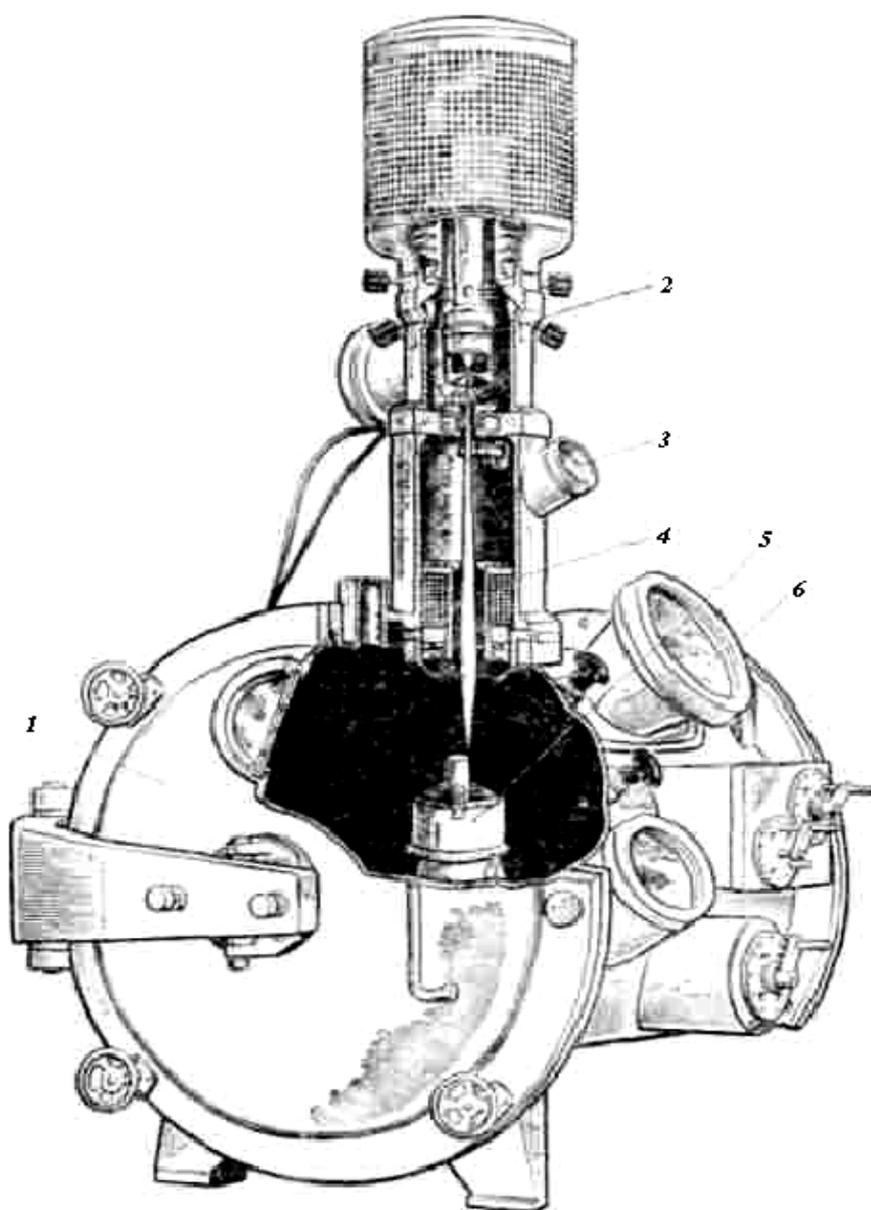


Рис. 12.7. Сварочная электронно-лучевая установка:
 1 – вакуумная камера; 2 – электронная пушка; 3,6 – смотровое окно;
 4 – отклоняющая система; 5 – механизм перемещения изделия

12.4.2. Электронные сварочные пушки

Источником тепла при электронно-лучевой сварке является энергия потока ускоренных электронов.

В электронно-лучевых установках электронный луч генерируется и управляется с помощью электронно-оптической системы, называемой **электронной пушкой**. Поток электронов, эмитируемых катодом, предва-

рительно ускоряется и формируется электростатическим полем в области катод – анод. Ток луча может регулироваться двумя путями: подачей отрицательного напряжения на управляющий электрод или изменением температуры катода. После анода движение электронов происходит по инерции со скоростью, соответствующей приложенной разности потенциалов. Изменение плотности энергии в потоке электронов осуществляется системой электромагнитной фокусировки.

Отклонение луча при необходимости совмещения пятна нагрева с линией стыка или его перемещение по изделию осуществляется системой электромагнитного отклонения луча.

Существует несколько систем электронных пушек: наиболее простыми являются пушки, в которых электронный пучок формируется только с помощью прикатодного электрода, а анодом является изделие (рис. 12.8, а).

Недостатками такой пушки являются малое расстояние между пушкой и изделием, недостаточная плотность энергии и отсутствие ее регулирования и т. п.

Несколько лучшие характеристики имеют пушки, в конструкции которых имеется ускоряющий электрод, находящийся под потенциалом изделия (рис. 12.8, б).

Применение ускоряющего электрода с отверстием для прохождения пучка электронов позволяет увеличить расстояние между катодом пушки и свариваемым изделием, что облегчает наблюдение за процессом сварки, уменьшает опасность электрических пробоев и т. п.

Наиболее совершенными являются пушки с комбинированной электростатической и электромагнитной фокусировкой пучка. Пушка состоит из катода прикатодного электрода, ускоряющего электрода-анода и электромагнитной фокусирующей системы (рис. 12.8, в).

Катоды электронных пушек должны удовлетворять ряду требований. Они должны обладать высокими эмиссионными свойствами, устойчиво работать в условиях вакуума, используемого при сварке, иметь достаточную долговечность и др.

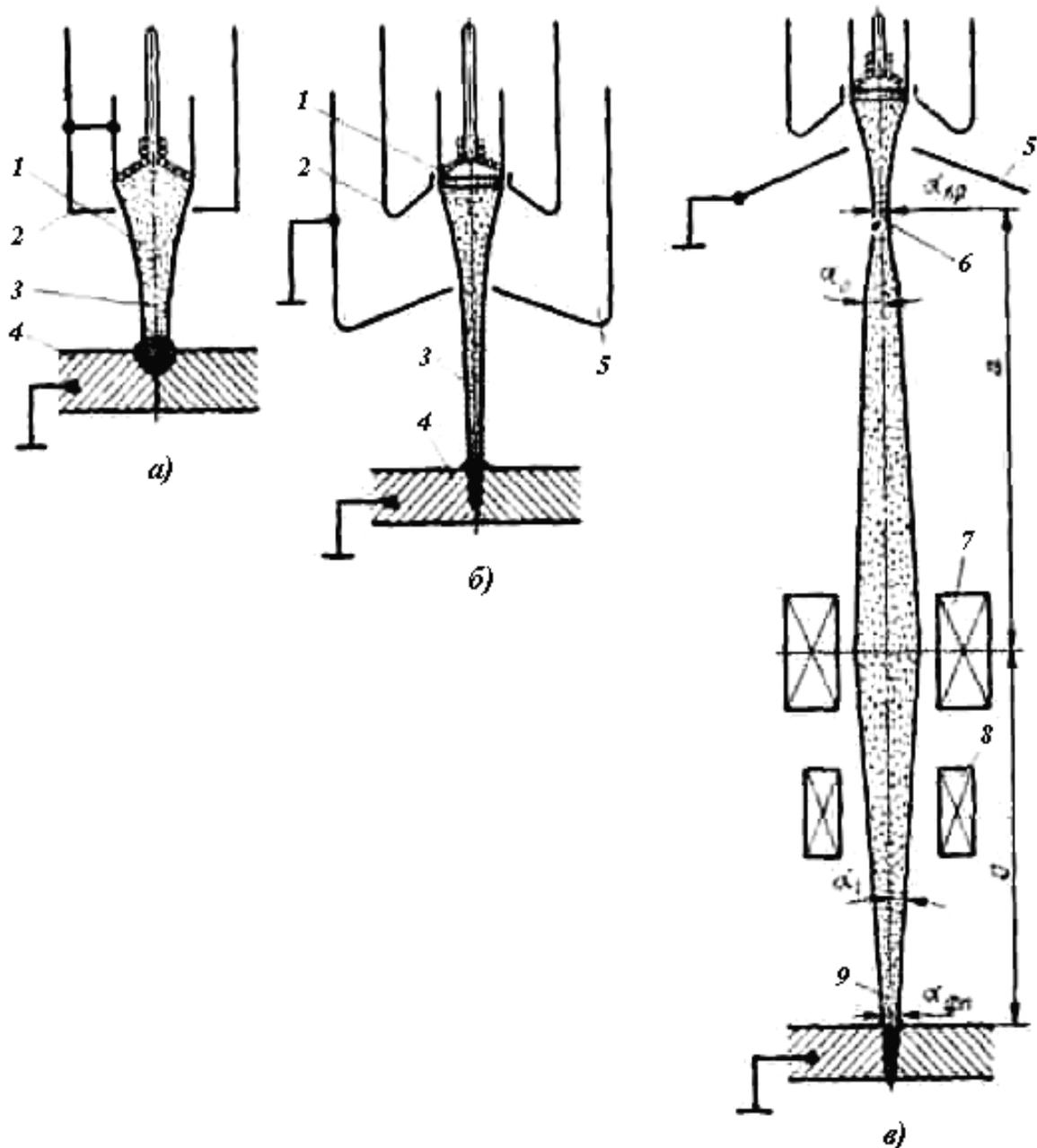


Рис. 12-08. Способы формирования электронного пучка:
a и б – однокаскадные системы без ускоряющего и с ускоряющим электродами (анодами); *в* – система с комбинированной электростатической и электромагнитной фокусировкой; 1 – катод; 2 – прикатодный электрод; 3 – траектория крайних электронов пучка; 4 – свариваемое изделие; 5 – ускоряющий электрод (анод); 6 – кроссовер; 7 – фокусирующая магнитная линза; 8 – система отклонения пучка; 9 – фокальное пятно; α_0 – половинный угол расхождения пучка после кроссовера; α_1 – половинный угол сходимости пучка на изделии

Конструктивно катоды сварочных электронных пушек выполняют прямонакальными и с косвенным подогревом (рис. 12.9).

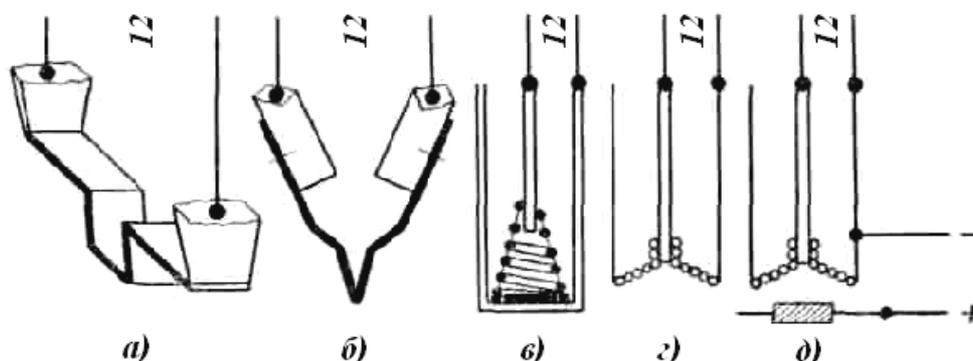


Рис. 12.9. Типы катодов сварочных пушек:

- a* — прямонакальный металлический ленточный катод;
- б* — V-образный прямонакальный металлический катод;
- в* — лантанборидный катод (LaB_6) с косвенным подогревом;
- г* — прямонакальный металлический катод в виде плоской спирали;
- д* — катод с косвенным подогревом электронной бомбардировкой

Прямонакальные катоды более просты в изготовлении, но имеют ряд недостатков: трудно обеспечить правильную геометрическую форму эмитирующей поверхности, изменяется форма пучка и др. Катоды с косвенным подогревом имеют более равномерную плотность эмиссии и более долговечны. В некоторых конструкциях сварочных пушек используют подогревные катоды из гексаборида лантана.

Эмиссионные свойства катода из гексаборидлантана превосходят все известные высокотемпературные катоды. Такие катоды достаточно долговечны и при нормальной эксплуатации срок службы их составляет 250 – 300 ч. Для нагрева боридлантановых катодов до рабочей температуры 1400 – 1650 °С используются вольфрамовые подогреватели. В сварочных пушках используются сменные *катоды из боридлантана* с различными диаметрами активной поверхности (3,0; 4,2; 4,75 мм). Такой выбор катодов обеспечивает диапазон мощностей от нескольких ватт до 10 – 12 кВт.

Однако при движении электронного пучка к изделию после выхода из межэлектродного пространства, где отсутствует фокусирующее электростатическое поле, поперечное сечение его увеличивается вследствие расталкивающего действия одноименных зарядов электронов. Для того чтобы создать необходимую плотность энергии в электронном пучке, заряды дополнительно фокусируют вторичной фокусирующей системой.

Вторичной фокусирующей системой сварочных пушек являются электромагнитные линзы, выполненные в виде катушки из достаточно большого числа витков; линза размещается в железном экране особой формы. Наличие электромагнитной фокусирующей линзы дает возможность получить острую фокусировку луча в месте сварки, и, кроме того, плотность энергии в луче или диаметр пучка с помощью магнитных линз можно менять в широких пределах путем изменения напряженности магнитного поля линзы.

Отклоняющие системы, используемые в электронно-лучевых пушках, предназначены для отклонения луча на заданное расстояние и для точной установки его на кромки свариваемого изделия.

Перемещение электронного луча по изделию может быть осуществлено различными способами: путем механического перемещения изделия под электронным лучом, перемещением пушки или изменением угла наклона ее, воздействием магнитных или электрических полей на электронный луч. В последних конструкциях электронных пушек получили большее применение электромагнитные отклоняющие системы.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается сущность процесса электронно-лучевой сварки?
2. Что представляет собой электронная пушка? Приведите схему установки для сварки электронным лучом.
3. Какие основные физико-механические характеристики электронно-лучевой сварки?
4. Назовите основные преимущества электронно-лучевой сварки.
5. Какие области применения электронно-лучевой сварки?
6. Как осуществляется сварка проплавными швами и сварка нескольких стыков одновременно?
7. Что представляет собой оборудование для электронно-лучевой сварки? Расскажите об устройстве электронно-лучевой установки.
8. Какие вы знаете схемы электронных сварочных пушек?
9. Какие бывают типы катодов сварочных пушек?

13. СВАРКА СВЕТОВЫМ ЛУЧОМ

13.1. Сущность лазерной сварки

Применяемый для расплавления металла при сварке **лазерный луч** представляет собой вынужденное монохроматическое излучение, длина волны которого зависит от природы рабочего тела лазера-излучателя и может быть в диапазоне 0,1... 1000 мкм. Оно возникает в результате вынужденных скачкообразных переходов возбужденных атомов рабочих тел лазеров на более низкие энергетические уровни. При этом возбужденный атом отдает энергию в виде фотонов с частотой, свойственной материалу применяемого рабочего тела. Испускание света можно инициировать воздействием внешнего фотона, обладающего энергией, соответствующей разнице энергий атомов в возбужденном и нормальном состояниях. В результате такого воздействия генерируются два фотона с одинаковой частотой, которые распространяются в направлении вектора внешнего фотона.

Одновременно может протекать и обратный переход. Поэтому для получения заметной генерации вынужденного излучения необходимо добиваться такого состояния рабочих тел, при котором преобладали бы переходы с возникновением новых фотонов. Этого состояния искусственно достигают воздействием различных источников энергии: электрической, световой, тепловой или химической, с помощью которых проводят так называемую «накачку» рабочих тел.

Излучателем (активным элементом) могут быть твердые тела: стекло с неодимом, рубин, гранат с эрбием и др. Квантовые генераторы на алюмонатриевом гранате с неодимом позволяют получать мощность до 1 кВт в непрерывном режиме.

В качестве излучателя используются также различные жидкости: растворы окиси неодима, красители и др. Жидкостные квантовые генераторы на неорганических жидкостях по своим характеристикам ближе всего стоят к твердотельным импульсным генераторам, но превосходят их по энергии в импульсе вследствие больших объемов активных элементов.

Излучателями могут быть также газы и газовые смеси: водород, азот, аргон, углекислый газ и др. У таких генераторов самый широкий спектральный диапазон излучения и наибольшая мощность в непрерывном излучении при достаточно высоком КПД (15 – 20 %).

В последнее время в качестве излучателей используют также полупроводниковые монокристаллы: арсениды галлия и индия, сплавы кадмия с се-

леном и серой и др. Генераторы с полупроводниковым излучателем обладают малым весом, экономичны и имеют самый высокий КПД (до 0,70).

Излучатель возбуждается и генерирует свет под действием энергии системы накачки: твердотельные и жидкие активные элементы возбуждаются светом импульсных ламп; газовые смеси в основном накачиваются энергией газового разряда; полупроводниковые излучатели используют энергию электрического тока, протекающего через область р – n-перехода. Разработаны системы, которые позволяют использовать для накачки газовых лазеров тепло и энергию химических реакций.

В зависимости от энергетических параметров системы накачки лазер работает в импульсном или непрерывном режиме.

В квантовых технологических генераторах (твердотельный лазер) обычно в качестве основного энергетического элемента используют рубин. Рубин – это окись алюминия, в которой небольшое число атомов алюминия замещено атомами хрома. Обычно в квантовых генераторах используют бледно-розовый рубин, содержащий 0,05 % Cr.

Используемый в лазере розовый кристалл рубина обрабатывается в виде стерженька, длина и диаметр которого определяют мощность излучения. Его торцы полируют до получения оптически плоской поверхности, затем их подвергают серебрению для получения отражающих поверхностей. Выходной конец кристалла является полупрозрачным. Рубиновый стерженек помещают вблизи электронной лампы вспышки, служащей источником широкополосного света для оптической накачки.

Лазер на кристалле рубина питается от импульсной лампы. При освещении лампой вспышкой рубинового стерженька большинство атомов хрома переводится в возбужденное состояние. При спонтанном испускании возбужденным атомом фотона параллельно оси кристалла фотон возбуждает другой возбужденный атом испустить второй фотон (индуцированный). Этот процесс продолжается лавинообразно, поскольку фотоны, отражаясь от торцов кристалла, движутся по кристаллу в осевом направлении. Интенсивность пучка растет в результате многократного отражения от обоих торцов стержня. В этом случае, если интенсивность света от импульсной лампы превысит некоторый критический уровень, начинает появляться эффект квантового усиления и тогда с полупрозрачного торца в течение тысячных долей секунды выбрасывается интенсивный поток фотонов с длиной волны 6943 А. Выходной пучок является узконаправленным, мощным, монохроматическим и когерентным.

13.2. Устройство и принцип работы оптического квантового генератора

Несмотря на низкий КПД оптических квантовых генераторов на рубине (~ 0,1 %), генераторы этого типа находят практическое применение при сварке. На рис. 13.1 представлена схема сварочного квантового генератора на рубине.

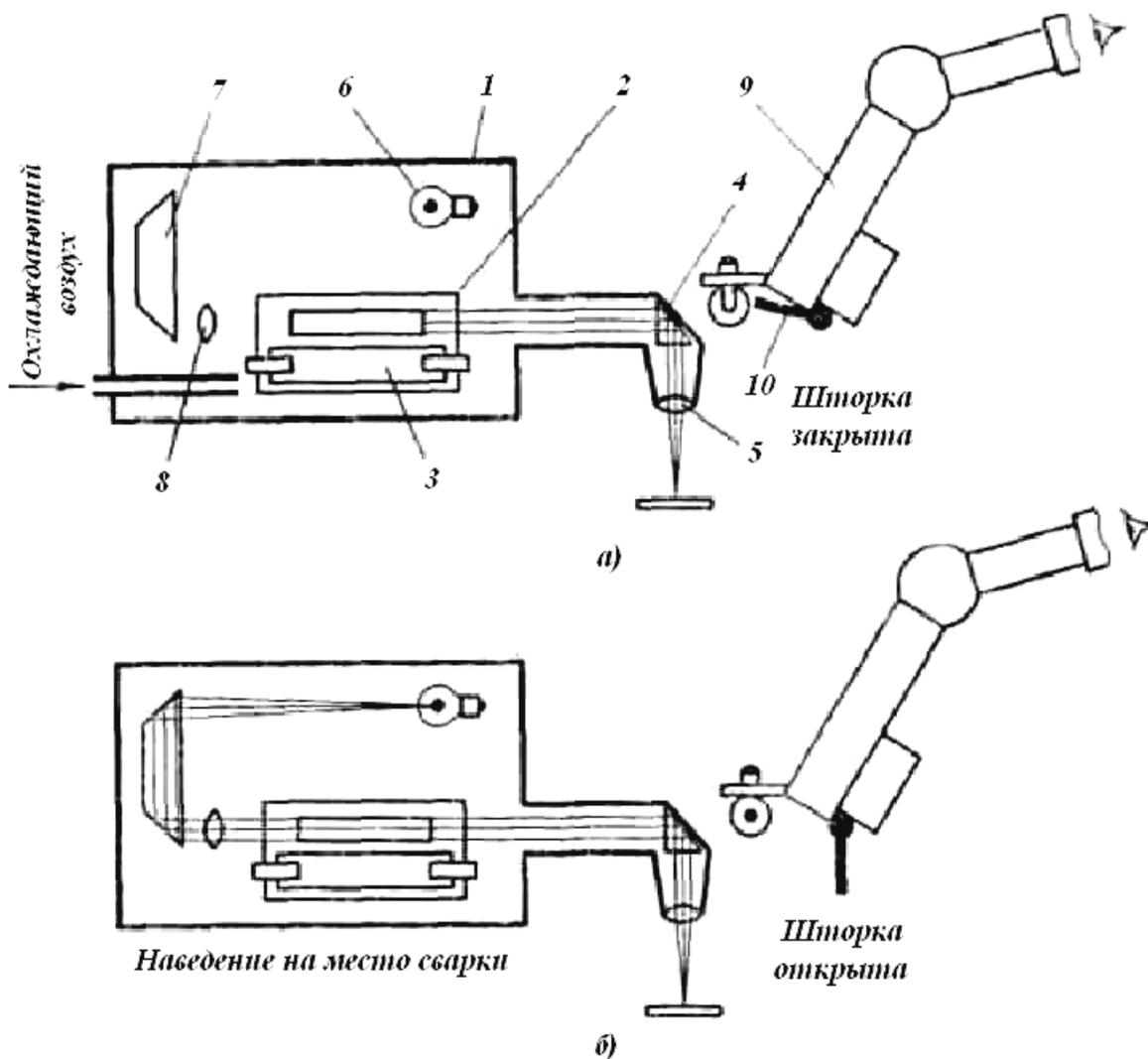


Рис. 13.1. Схема сварочного квантового генератора:

а – сварка; *б* – настройка генератора перед сваркой;

- 1 – осветительная камера; 2 – кристалл рубина; 3 – импульсная лампа;
4 – оптическая призма; 5 – сменный объектив; 6 – осветитель; 7 – призма;
8 – конденсорная линза; 9 – стереоскопический микроскоп; 10 – затвор.

Сварочная установка представляет собой комплекс оптико-механических и электрических элементов, основным из которых является оптический квантовый генератор на рубиновом кристалле.

Установка состоит из генератора, блока питания, стола с конденсаторами и стереоскопического микроскопа.

Генератор предназначен для преобразования энергии, запасенной в блоке конденсаторов, в узконаправленный, монохроматический, когерентный световой пучок.

Основным узлом генератора является осветительная камера 1 (рис. 13.1, а), внутри которой вставлен кристалл рубина 2. В камере параллельно кристаллу установлена импульсная лампа 3, на концы которой подводится высокое напряжение. Внутренняя поверхность камеры отполирована и является отражателем света. В камеру подается сжатый воздух для охлаждения кристалла рубина. Использованный воздух уходит в атмосферу. Для формирования испускаемого кристаллом рубина излучения и направления его на место сварки служит формирующая оптическая система, состоящая из призмы 4, линзы и сменного объектива 5. Формирующая система снабжена сменными объективами, которые фокусируют параллельный пучок света, испускаемый генератором, в пятно диаметром 0,05 – 0,25 мм.

Для настройки генератора используют оптическое устройство, состоящее из осветителя 6, призмы 7 и конденсорной линзы 8. Луч света от осветителя проходит через рубин и оптическую систему генератора, имитируя прохождение излучения от кристалла (рис. 13.1, б). Для визуального наблюдения за местом сварки при наведении луча подсветки на место сварки и для осмотра сваренных элементов служит стереоскопический микроскоп 9. Для защиты глаз оператора, работающего на установке, от излучения генератора в момент вспышки сварки предусмотрен затвор 10, приводимый в движение электромагнитом.

Электрическая схема установки состоит из блока питания импульсной лампы, стола с входящим в него затвором и трансформатором подсветки, генератора. На лампу вспышки подается напряжение, равное 18 кВ.

Для изменения времени разряда и, следовательно, времени горения лампы в цепи лампы установлены индуктивности, меняя величину которых, можно менять и время длительности импульса.

Для осуществления сварки необходимо, чтобы импульсы имели максимальную длительность при минимальных интервалах между ними. Однако вследствие низкого КПД квантовых генераторов на рубине большая часть энергии лампы накачки превращается в тепло, вследствие чего эти лампы не могут работать при высокой частоте повторения импульсов, а рубиновый стержень перегревается.

Для уменьшения перерывов между импульсами необходимо интенсивно отводить значительное количество тепла, выделяемого при оптической накачке лазера. Частота повторения импульсов и мощность квантового генератора, таким образом, ограничиваются охлаждающими системами, отводящими тепло, возникающее в квантовых генераторах. Существующие сварочные оптические квантовые генераторы дают возможность получить частоту повторения импульсов от 1 до 100 в минуту. Диаметр площади проплавления, получающейся в результате действия одного импульса луча лазера, составляет десятые доли миллиметра. Поэтому существующие оптические квантовые генераторы пока не могут быть использованы для сварки швов и используются лишь при сварке соединений типа точечной сварки.

13.3. Области применения сварочной лазерной технологии

Резка лазером является наиболее распространенной технологической операцией. Лазером можно резать стекла, керамики, алмазы, металлы и др.

При резке используют лазеры непрерывного действия, обладающие большими энергиями излучения в инфракрасном диапазоне (длина волны равна 10,6 мкм). Резка кремниевых и германиевых пластин на отдельные элементы, необходимые в полупроводниковой промышленности, осуществляется воздействием сфокусированного луча лазера непрерывного действия. При этом происходит испарение части материала на поверхности пластины и образуется канавка. В дальнейшем необходимо приложить механическое усилие, и пластины расколются по линиям канавок.

Аналогичными резке являются процессы подгонки резисторов и обработки интегральных схем. Лазерный луч испаряет части металлической пленки резистора, при этом электрическая цепь может находиться под напряжением, что обеспечивает непрерывный контроль сопротивления прибора. Обработку можно производить в атмосфере, в вакууме и различных газах, при этом луч лазера может свободно проникать через стекло, кварц, воздух. Так как квантовый генератор на рубине имеет КПД порядка 0,1 %, то только 0,001 доля номинальной энергии поджига газоразрядной лампы превращается в энергию луча, генерируемого лазером, которая и подается на свариваемое изделие в виде короткого импульса.

Перспективной областью применения лазерной сварки является сварка микросоединений. Широкое применение лазерная сварка находит

в радиоэлектронике и электронной технике при сварке контактов проводников с пленками на микроплатах, твердых схемах и микроэлементах.

Лазерным лучом можно сваривать самые различные композиции металлов, используемых в микроэлектронике: золото – кремний, германий – золото, никель – тантал, медь – алюминий и др.

Возможность получения мощных лазерных лучей открывает перспективу их использования для технологических целей.

Луч газового лазера непрерывного действия характеризуется малым поглощением в газах, простотой фокусировки и транспортировки энергии при помощи зеркал в труднодоступные места, однако защита сварочной ванны производится инертным газом. Исходный луч имеет форму кольца, который фокусируется с помощью оптической системы.

Использование лазеров непрерывного действия на CO_2 дает возможность получать сварные соединения стали толщиной до 15 мм. В перспективе имеется возможность увеличения толщины свариваемых изделий и использования их для термообработки и резки металлов. На рис. 13.2 представлена схема лазерной двухпозиционной установки для сварки и термической обработки изделий.

13.4. Сварка и пайка энергией лучей оптического диапазона

Большой интерес вызывает применение для сварки и пайки сфокусированной лучистой энергии различных источников, излучающих в оптическом диапазоне частот.

Нагрев лучистой энергией обладает некоторыми преимуществами по сравнению с другими способами, а именно возможность термической обработки материалов независимо от их электрических и магнитных свойств; бесконтактным подводом энергии к изделию (причем источник и нагреваемый объект могут располагаться на значительном расстоянии друг от друга); незначительным механическим воздействием на зону нагрева; возможностью передачи энергии через оптически прозрачные оболочки, что позволяет проводить процессы сварки и пайки в контролируемой газовой атмосфере и в вакууме.

В установках для сварки и пайки световым лучом можно использовать такие источники излучения, как Солнце, угольная дуга, дуговые газоразрядные лампы и лампы накаливания.

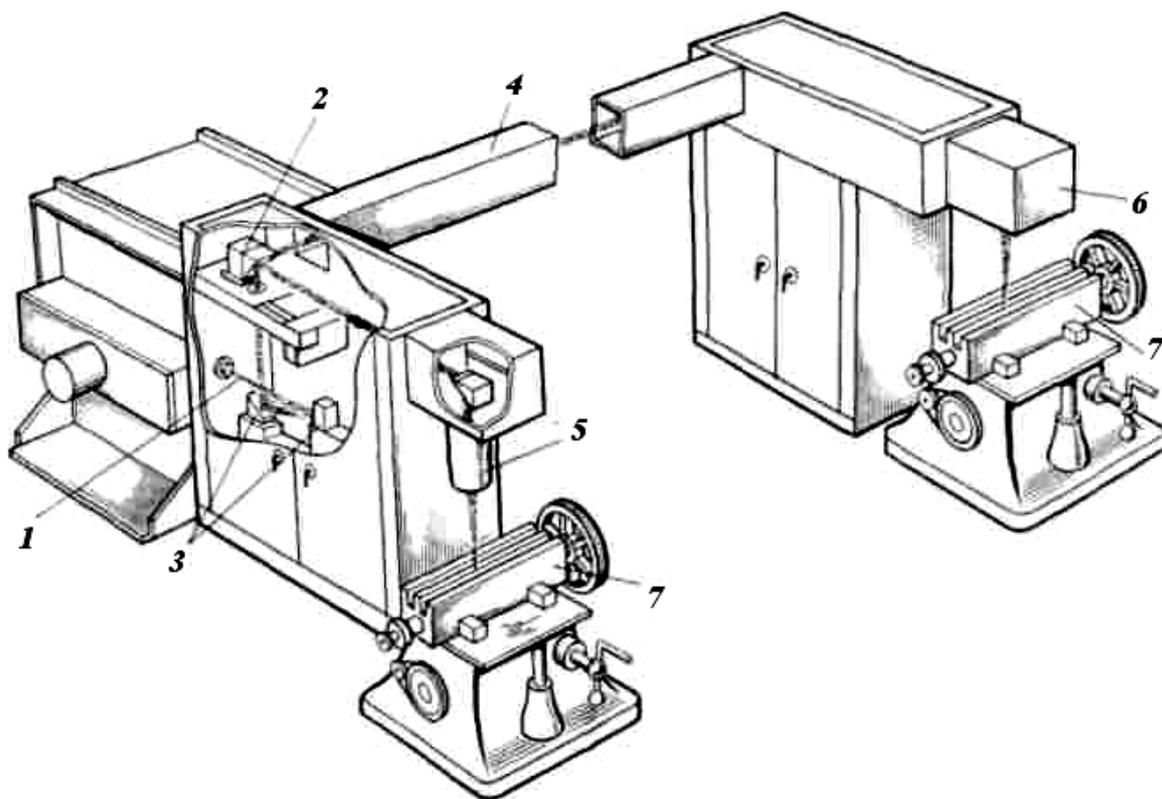


Рис. 13.2. Схема мощной лазерной установки, разработанной для сварки и термообработки:

- 1 – выход луча из газового квантового генератора; 2 – поворотное зеркало;
 3 – зеркала; 4 – лучепровод; 5 – система фокусировки для сварки;
 6 – система фокусировки для термообработки; 7 – рабочие столы с изделиями

Работы, проведенные в МАТИ, показали, что наиболее перспективным и удобным излучателем для технологических целей являются дуговые неоновые лампы сверхвысокого давления.

Отечественная промышленность серийно выпускает дуговые неоновые лампы следующих типов: с воздушным охлаждением ДКСШ-500 (0,5 кВт), ДКСШ-100М (1 кВт) и ДКСШ-3000 (3 кВт); с комбинированным водяным и воздушным охлаждением ДКСР-300 (3 кВт), ДКСР-5000 (5 кВт) и ДКСР-10000 (10 кВт).

Дуговая неоновая лампа представляет собой шаровой баллон из оптически прозрачного кварца с помещенными в него двумя вольфрамовыми электродами. Давление неона в лампе в нерабочем состоянии достигает 10 ат. Электропитание ламп осуществляется от источников постоянного тока с напряжением холостого хода не ниже 70 В и с падающей характеристикой (например, ИПШ-500 В). Лампы могут работать в непрерывном режиме сотни часов.

Создан ряд специализированных экспериментальных установок для сварки и пайки сфокусированной лучистой энергией неоновых ламп мощностью от 0,5 – 10 кВт. В этих установках излучение неоновой лампы фокусируется на изделие с помощью эллипсоидного отражателя. С целью увеличения плотности энергии в пятне нагрева используется дополнительная линзовая оптика (рис. 13.3, а, б).

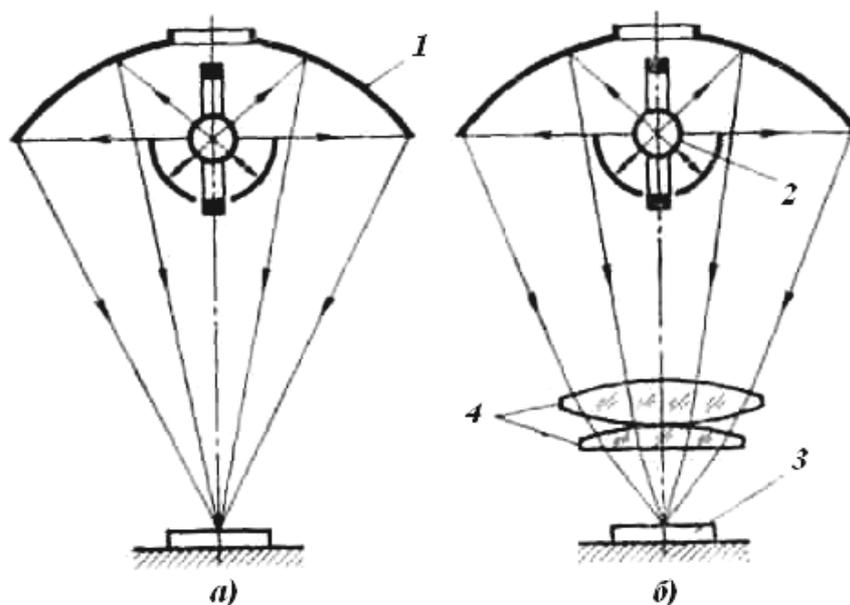


Рис. 13.3. Оптические схемы установок для сварки лучистой энергией:
а – моноэллипсоидная система; *б* – то же, с двухлинзовым конденсором;
 1 – отражатель; 2 – лампа; 3 – изделие; 4 – конденсор

Экспериментально установлено, что оптический источник тепла является нормально-круговым и по плотности энергии в пятне нагрева занимает промежуточное положение между газовым пламенем и электрической дугой, а по сосредоточенности близок поверхностным металлическим дугам.

В рабочем пятне установки УСПЭЛ-1-МАТИ с неоновой лампой ДКСР-10000 максимальная плотность лучистого потока составляет 2600 Вт/см^2 . Лучистый поток такой плотности достаточен для плавления молибдена. КПД установок составляет 0,1 – 0,2 в зависимости от оптической системы и типа лампы.

Ввиду сравнительно низкой эффективной мощности оптический источник тепла целесообразно использовать для сварки материалов малых толщин.

Исследования по сварке нержавеющей стали и титановых сплавов показали возможность получения качественных соединений на листовом

материале толщиной 0,1 – 2 мм. При этом обеспечивается вакуумная плотность и прочность не ниже 90 % от прочности основного материала. Скорость сварки листов толщиной 0,5 мм составляет 10 – 15 м/ч.

Широкие пределы регулирования энергетических параметров позволяют использовать оптический источник для пайки практически любыми из существующих припоев, начиная от оловянно-свинцовых и кончая тугоплавкими на основе никеля и титана.

Оптический источник позволяет сваривать также и неметаллические материалы (стекло, керамику, пластмассу). Успешно осуществлен процесс сварки шлакового стекла, который широко применяется в технике.

Оптический источник тепла можно использовать также для локальной термической обработки сварных соединений.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается сущность процесса лазерной сварки?
2. Какие излучатели используются в квантовых генераторах?
3. Как работает квантовый генератор? Какой принцип работы оптического квантового генератора?
4. Покажите схему работы сварочного квантового генератора, поясните его работу.
5. Приведите области применения сварочной лазерной технологии.
6. Что представляет собой сварка и пайка энергией лучей оптического диапазона?
7. Приведите оптические схемы установок для сварки лучевой энергией.
8. Для каких целей используется светолучевая сварка?

14. ПЛАЗМЕННАЯ СВАРКА И ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

14.1. Характеристика плазменной струи, и ее применение

В качестве источника теплоты при некоторых видах обработки материалов используют **плазменную струю** – поток ионизированных частиц, обладающих большим запасом энергии. Плазменная струя представляет собой высокоинтенсивный источник теплоты, максимальная температура которого может достигать 20 000 К и более.

Плазменную струю используют для наплавки и нанесения покрытий, в том числе и тугоплавких металлов на изделия путем расплавления присадочной проволоки или металлических порошков. С помощью плазменной струи производят резку и поверхностную обработку различных материалов, нагрев под пайку и термообработку. Плазменная струя может найти применение и для сварки тонколистовых тугоплавких металлов. В струе плазмы можно расплавить различные материалы: сталь, асбоцемент, кристаллокорунд 2050 °С (2323 К), карбокорунд 2200 °С (2473 К) и др.

Для создания ионизированного потока используют дуговой разряд значительной длины, возбуждаемый между двумя электродами. Дуга горит в замкнутом цилиндрическом канале, стенки которого интенсивно охлаждаются, через канал под давлением подается инертный газ. Охлаждение наружной поверхности столба дуги вызывает его концентрацию (отшнуровывание), вследствие чего температура столба дуги резко повышается, достигая 10000 – 20000 К, а газ, проходящий через межэлектродное пространство, имеющий высокую степень ионизации и относительно высокий запас энергии, используют для нагрева изделий в процессе сварки.

Состав плазмообразующего газа и материала электродов выбирают в зависимости от требований, предъявляемых к процессу. В качестве стабилизирующих газов применяют азот, аргон, водород, гелий, воздух и их смеси. Электроды изготовляют обычно из меди и вольфрама. Стенки камеры защищены от теплового воздействия дуги слоем сравнительно холодного газа.

Подводимая к дуговому разряду электрическая мощность не полностью преобразуется в плазменной горелке в потенциальную и кинетическую энергию плазменной струи. Часть энергии дуги расходуется на нагрев электродов разряда, а также рассеивается в окружающее пространство вследствие лучистого и конвективного теплообмена.

Интенсивность теплообмена дуги с отдельными элементами плазменной горелки в значительной мере определяют такие параметры плазменной

струи, как мощность, температура, энтальпия и скорость, а также геометрические размеры канала и сопла горелки. Наиболее существенное влияние на мощность, расходуемую на нагрев электродов, оказывают ток и длина дуги, а также расход газа. В стержневом электроде (катод) выделяется примерно до 10 %, а кольцевом (сопло – анод) – 15 – 50 % мощности дуги.

14.2. Способы получения плазменных струй

Имеется несколько схем устройств для получения плазменной струи: раздельное сопло и канал, плазменная струя выделена из столба дуги (рис. 14.1, а); совмещенное сопло и канал, плазменная струя выделена из столба дуги (рис. 14.1, б); сопло и канал совмещены со струей, совпадающей со столбом дуги (рис. 14.1, в).

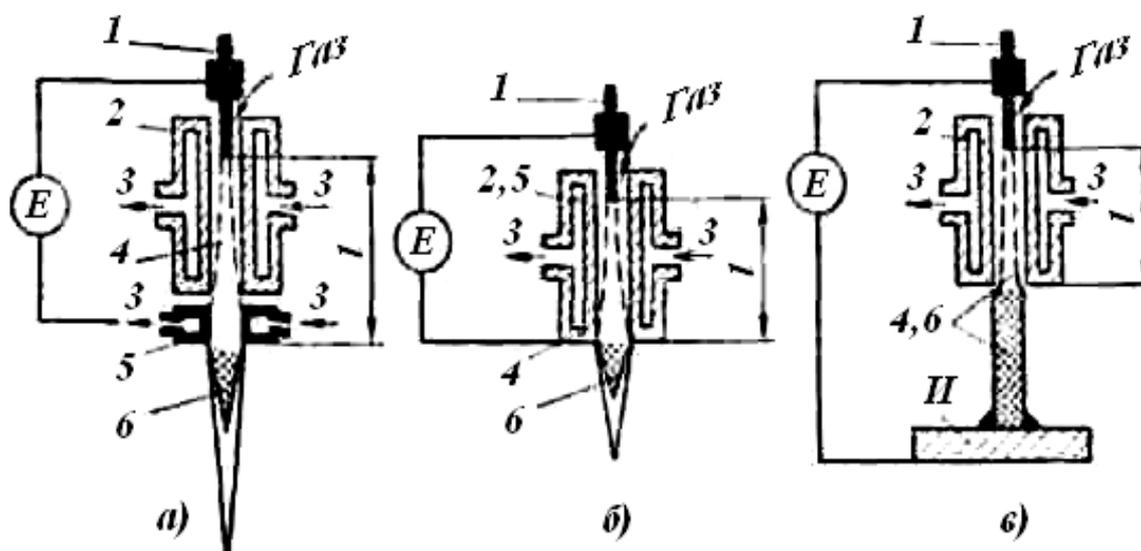


Рис. 14.1. Схемы устройств для создания плазменной струи:

1 – вольфрамовый электрод; 2 – сопло; 3 – водоохлаждаемая рубашка;
4 – дуговой разряд; 5 – электрод; 6 – струя; E – источник питания; II – изделие

Плазменная струя создается дуговым разрядом 4, возбуждаемым между электродом 1 и электродом 5 с отверстием, выполняющим роль сопла. Дуговой разряд происходит в канале 2, электрически изолированном от сопла и электрода. Через канал вдоль столба дуги пропускается газ, который, проходя по направлению от электрода к соплу через плазму дуги, ионизируется и выходит из сопла в виде ярко светящейся струи 6. Устройство для создания плазмы охлаждается водой 3. Мало ионизированная сравнительно холодная струйная оболочка газа, соприкасающаяся со стенками сопла и канала, изо-

лирует последние от теплового воздействия разряда. Опусканием электрода в канал регулируют напряжение дуги и мощность плазменной струи.

При создании плазменной струи по схеме с совмещенными каналом и соплом (рис. 14.1, б) электрически активное пятно дуги в зависимости от состава и расхода газа, длины канала и других факторов располагается или на боковой поверхности канала, или на его торце. В этом случае длина дуги не является независимым параметром регулирования эффективной мощности плазменной струи.

В обоих случаях плазменную струю, выделенную из токоведущего столба дуги, используют как независимый источник теплоты.

При обработке плазменной струей электропроводных металлов для увеличения эффективной тепловой мощности, вводимой в изделие, последнее можно подключать к источнику питания (рис. 14.1, в). В этом случае плазменная струя полностью совпадает с токоведущим столбом разряда, частично проходя через изолированный канал 2.

Для промышленного использования выпускают несколько типов плазменных горелок, предназначенных для резки, напыления и т. п.

14.3. Сварка плазменной дугой

Сварка плазменной дугой находит применение при изготовлении изделий из нержавеющей стали, титана, никелевых сплавов, молибдена, вольфрама и многих других металлов и сплавов в авиационной и электронной промышленности, судостроении, нефтехимическом машиностроении и ряде других отраслей техники.

По сравнению с аргонодуговой сваркой плазменно-дуговая сварка отличается более стабильным горением дуги. При плазменной сварке обеспечивается более равномерное проплавление кромок.

Наиболее распространен способ сварки плазменной дугой, при котором дуговой разряд возбуждается между неплавящимся электродом плазменной горелки и свариваемым изделием (рис. 14.2).

Плазменная дуга, используемая для сварки металла, по проплавляющей способности занимает промежуточное положение между электронным лучом и сварочной дугой, горящей в аргоне. Столб дуги и струя плазмы имеют цилиндрическую форму, поэтому величина поверхности металла, через которую осуществляется теплопередача от струи к металлу, не зависит от расстояния между электродом горелки и свариваемым изделием.

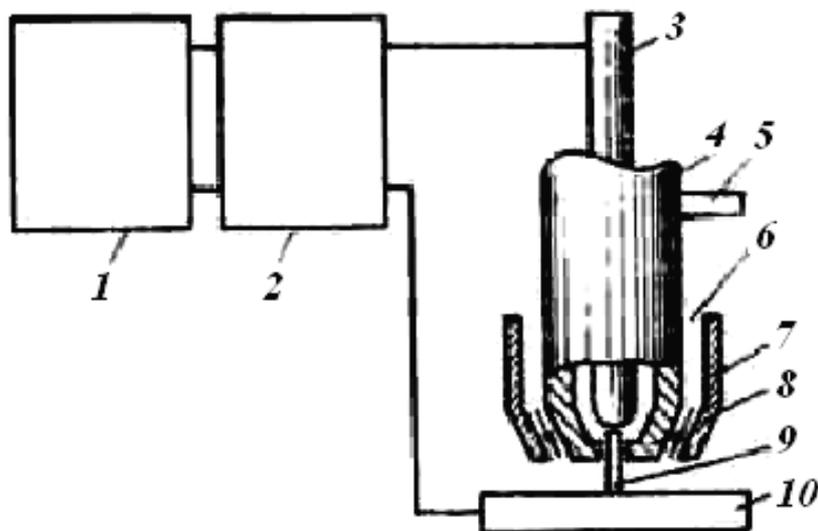


Рис. 14.2. Схема сварки плазменной дугой:

- 1 – сварочный источник питания; 2 – высокочастотный генератор;
 3 – вольфрамовый электрод; 4 – плазмообразующий газ;
 5 – охлаждающая вода; 6 – защитный газ; 7 – сопло для защитного газа;
 8 – сопло, формирующее дугу; 9 – дуга; 10 – изделие

Благодаря цилиндрической форме столба дуги процесс плазменно-дуговой сварки менее чувствителен к изменению длины дуги, чем процесс аргонодуговой сварки. Изменение длины дуги конической формы (при аргонодуговой сварке) всегда ведет к изменению диаметра пятна нагрева, а следовательно, и к изменению ширины шва. Плазменная дуга позволяет иметь практически постоянный диаметр пятна и дает возможность стабилизировать проплавление основного металла. Это свойство плазменной дуги с успехом используется при сварке очень тонких листов.

Пятну нагрева при сварке плазменной дугой может быть придана наиболее благоприятная форма. Изменения формы пятна нагрева достигаются применением специальных сопел (рис. 14.3).

Если необходимо иметь пятно нагрева вытянутой формы, то в сопле делают два дополнительных отверстия (рис. 14.3, б). Через эти отверстия поступает холодный плазмообразующий газ, что приводит к уменьшению поперечного размера пятна нагрева и придает ему вытянутую форму. При сварке таким соплом зона термического влияния сужается, а скорость сварки возрастает на 50 – 100 %.

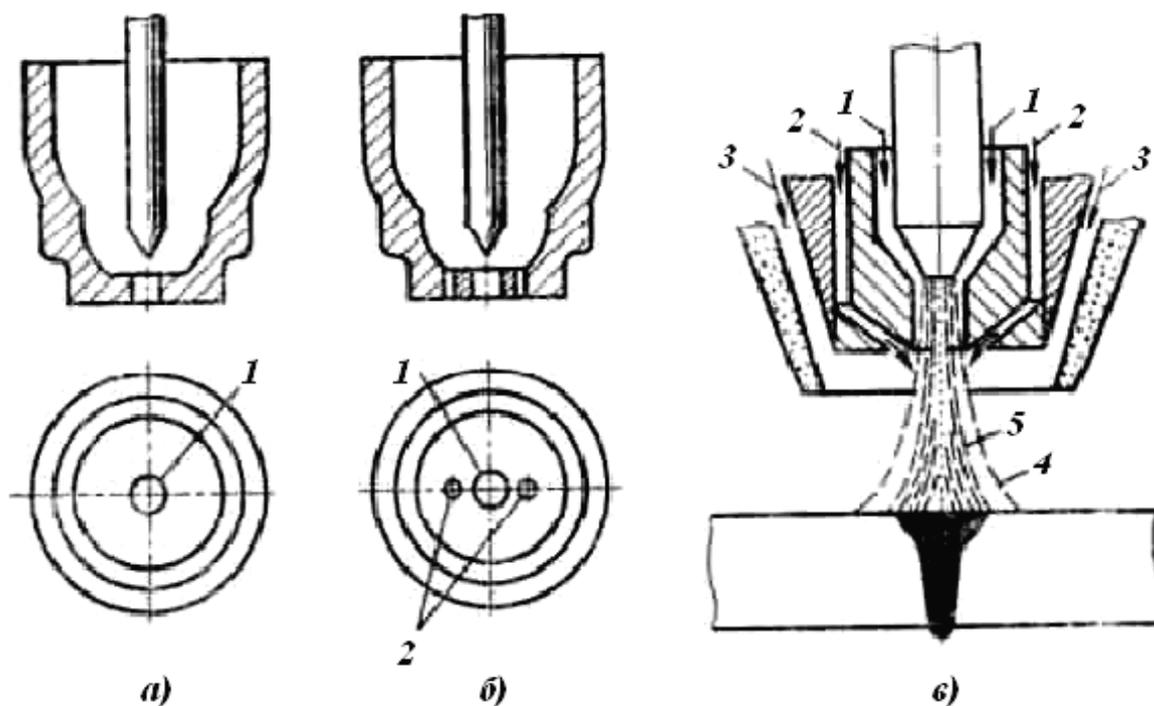


Рис. 14.3. Схемы плазмобразующих сопел для сварки плазменной дугой:
а – с круглым пятном нагрева; *б* – с вытянутым пятном нагрева
 (1 – центральный канал для газа, обеспечивающий образование плазменной дуги;
 2 – боковые отверстия для прохода холодного фокусирующего газа);
в – с дополнительным газовым потоком для фокусировки дуги
 (1 – плазмобразующий газ; 2 – фокусирующий газ; 3 – защитный газ;
 4 – очертания дуги при отсутствии фокусирующего газа;
 5 – то же, с фокусирующим газом)

Другая разновидность сопла с дополнительными отверстиями для создания фокусирующего газового потока приведена на рис. 14.3, *в*. Плазмобразующий газ 1 подается тангенциально, что позволяет при небольшом его расходе хорошо стабилизировать дугу. Поток фокусирующего газа направлен под углом к оси столба дуги и благодаря этому создает ее дополнительное сжатие.

Деформировать пятно плазменной дуги возможно путем наложения на нее неоднородного магнитного поля, создаваемого двумя парами магнитных полюсов. При помещении дуги в середину такой магнитной системы дуга вытягивается в одном направлении, превращаясь в линейный источник теплоты.

Сварка плазменной дугой характеризуется глубоким проплавлением основного металла в форме «замочной скважины».

Расход плазмобразующего газа устанавливают таким, чтобы истечение плазмы из сопла не было турбулентным, а силовое воздействие плазменной струи на поверхность сварочной ванны не приводило к разбрызгиванию расплавленного металла.

В качестве плазмообразующего газа обычно применяют аргон или его смеси с водородом или гелием.

Плазменной дугой сваривают листы толщиной до 9,5 мм встык без разделки кромок и присадочного металла. В ряде случаев успешно сваривают за один проход листы толщиной до 12,7 мм. При сварке листов толщиной до 25 мм требуется V- или U-образная подготовка кромок, причем глубина и угол разделки значительно меньше, чем для аргонодуговой сварки. При плазменно-дуговой сварке количество присадочного металла снижается примерно в 3 раза. Наибольшие преимущества сварка плазменной дугой дает при соединении толстых листов без разделки кромок и без присадочного металла.

При сварке кольцевых швов, например при сварке труб, процесс сварки в начале и конце шва целесообразно производить с программным изменением параметров режима. Благодаря программированию параметров режима сварки можно успешно заварить замок шва, который получается ровным, без заметных шероховатостей и подрезов.

Присадочный металл вводят в плазменную струю в конце сварочной ванны.

Плазменно-дуговая сварка может быть выполнена практически в любом пространственном положении.

Большие преимущества плазменная дуга имеет при сварке труб, где ее применение обеспечивает резкое повышение производительности. Так, например, замена аргонодуговой сварки труб из нержавеющей стали с толщиной стенки 2,3 и 7 мм сваркой плазменной дугой позволяет увеличить скорость сварки на 50 – 200 %.

14.4. Сварка микроплазменной дугой

Микроплазменной дугой (сила тока 0,1 – 10 А) сваривают листы толщиной 0,025 – 0,8 мм из углеродистой и нержавеющей стали, меди, инконеля, хастеллоя, кобальта, титана, тантала, молибдена, вольфрама и других металлов и сплавов.

Микроплазменная дуга находит широкое применение в радиоэлектронике и приборостроении для сварки тонких листов и фольги.

По сравнению с аргонодуговой сваркой изменение длины микроплазменной дуги оказывает значительно меньшее влияние на качество сварного соединения. Исходя из допустимого 20 %-ного изменения поперечного сечения пятна нагрева при сварке, длина плазменной дуги может

колебаться в пределах $\pm 1,27$ мм, в то время как длина дуги при обычной дуговой сварке в аргоне ограничивается при тех же условиях $\pm 0,127$ мм.

Вольт-амперные характеристики плазменной дуги показывают, насколько велики возможности механизации процесса сварки. Высокие градиенты потенциала в столбе такой дуги (0,79 – 7,9 В/мм в зависимости от тока и состава газа) позволяют получать большое отклонение напряжения при незначительном изменении длины дуги (до 10 В при отклонении длины дуги $\pm 1,27$ мм). Это обстоятельство весьма важно для автоматического поддержания длины дуги при механизированной сварке. Кроме того, при сварке плазменной дугой возможно резкое изменение направления сварки при высокой скорости, например на 45° при скорости 75 см/мин. Небольшие добавки водорода в защитный аргон улучшают теплопередачу от дуги к изделию. Гелиево-аргоновые смеси рекомендуется применять для сварки титана и других активных металлов, чтобы исключить их загрязнение. Хорошие результаты дает микроплазма при сварке угловых соединений. При необходимости сварку ведут с присадочным металлом.

14.5. Плазменно-дуговая сварка плавящимся электродом

Этот способ представляет собой сочетание сварки плазменной дугой и сварки плавящимся электродом в среде инертного газа (рис. 14.4).

Электродную проволоку подают по оси плазменной дуги, а вольфрамовый электрод, расположенный в дуговой камере плазменной горелки, наклонен под некоторым углом к оси горелки. В некоторых конструкциях плазменных горелок вольфрамовый электрод отсутствует, и его заменяет внутреннее сопло. Плавящийся электрод питается от отдельного источника тока с жесткой внешней характеристикой. Производительность расплавления электродной проволоки, которая зависит от ряда параметров процесса сварки (силы тока, диаметра проволоки, полярности тока, диаметра сопла и др.), может достигать 30 кг/ч.

Этот комбинированный способ сварки обеспечивает возможность получения проплавления различной формы, вплоть до узкого, присущего сварке плазменной дугой.

При сварке на обратной полярности обоих электродов при большом токе на плавящемся электроде наблюдается вращение дуги, в результате чего образуется широкий шов с неглубоким проплавлением. Погонная энергия сварки регулируется изменением тока в плазменной дуге: вольфрамовый электрод – изделие.

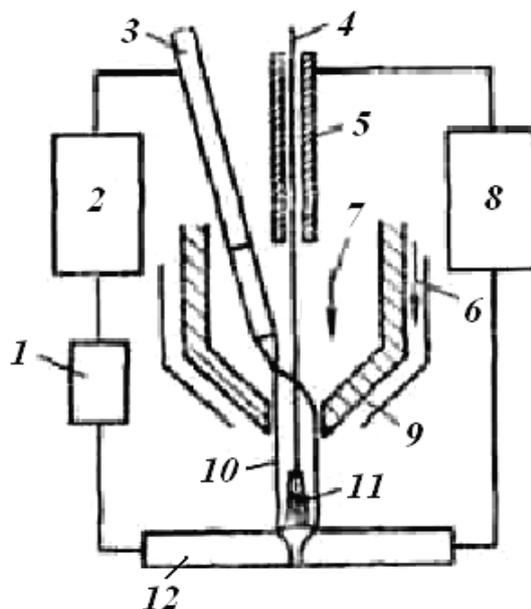


Рис. 14.4. Схема комбинированного способа – плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом: 1 – источник тока с падающей внешней характеристикой; 2 – осциллятор; 3 – вольфрамовый электрод; 4 – электродная проволока; 5 – токоподвод; 6 – защитный газ; 7 – плазмообразующий газ; 8 – источник тока с жесткой внешней характеристикой; 9 – медное сопло; 10 – плазменная дуга; 11 – сварочная дуга; 12 – свариваемое изделие

Контрольные вопросы

1. В чем заключается сущность процесса плазменной сварки и обработки металлов?
2. Какие вы знаете способы получения плазменных струй? В чем их отличия?
3. Как осуществляется сварка плазменной дугой?
4. Приведите различные схемы плазмообразующих сопел и поясните их работу.
5. В чем сущность сварки микроплазменной дугой?
6. Как работает плазменно-дуговая сварка плавящимся электродом? Покажите схему сварки.

15. СВАРКА И РЕЗКА ПОД ВОДОЙ

15.1. Подводная сварка

15.1.1. Сущность процесса сварки под водой

Способ дуговой сварки под водой основан на способности дуги устойчиво гореть в газовом пузыре при интенсивном охлаждении окружающей водой (рис. 15.1).

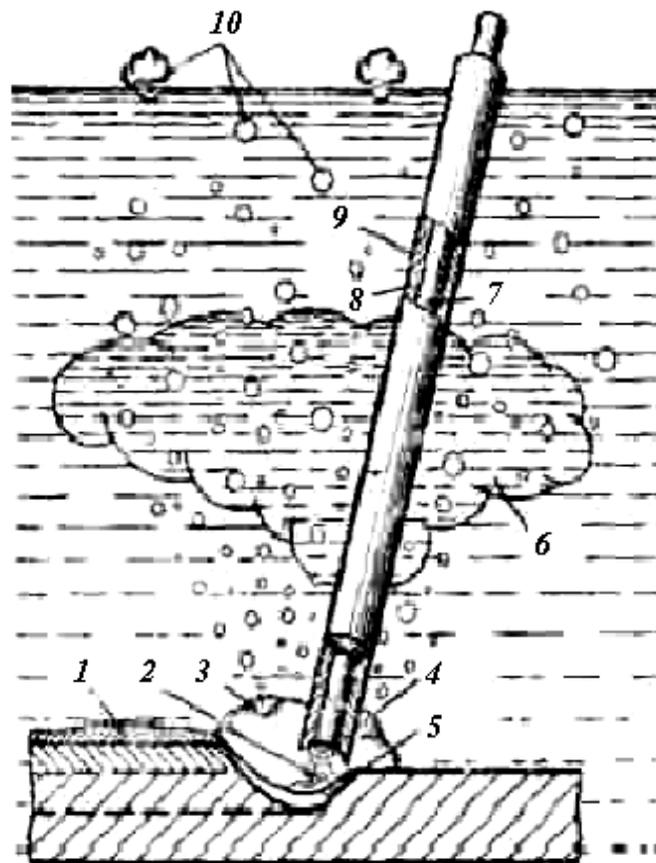


Рис. 15.1. Принципиальная схема горения дуги под водой:

- 1 – шлак; 2 – дуга; 3 – газовый пузырь; 4 – козырек; 5 – сварочная ванна;
6 – облако мути; 7 – металлический стержень; 8 – обмязка;
9 – водонепроницаемое покрытие; 10 – пузырьки газа

Газовый пузырь образуется за счет испарения и разложения воды, паров и газов расплавленного металла и обмязки электрода.

Вокруг горячей дуги выделяется большое количество газов, что приводит к повышению давления в газовом пузыре и частичному выделению газов в виде пузырьков на поверхности воды. Вода разлагается в дуге на свободный водород и кислород; последний соединяется с металлом, об-

разуя окислы. Взвешенные в воде продукты сгорания металла и обмазки, состоящие преимущественно из окислов железа, образуют облако взвесей, которое затрудняет наблюдение за дугой.

Устойчивое горение дуги под водой можно объяснить принципом минимума энергии Штеенбека, т. е. усиленное охлаждение какого-либо участка дуги компенсируется увеличением количества выделяемой энергии на нем. Для компенсации тепловых потерь из-за охлаждающего действия воды и наличия большого количества водорода напряжение на дуге под водой требуется более высокое (30 – 35 В).

Сварку под водой выполняют на постоянном и переменном токе. На постоянном токе дуга горит более устойчиво, чем на переменном, так как постоянный ток разлагает воду еще до возбуждения дуги, а переменный ток разлагает воду и образует газовый пузырь в момент короткого замыкания под действием высокой температуры.

С увеличением глубины и давления окружающей среды устойчивость дуги не нарушается; возрастает только напряжение и увеличивается ток.

Подводная сварка возможна в пресной речной и соленой морской воде. В качестве источников питания используют однопостовые и многопостовые сварочные агрегаты, сварочные преобразователи и трансформаторы, имеющие напряжение холостого хода 70 – 110 В.

15.1.2. Применяемые материалы оборудование и приемы выполнения сварки под водой

Для ручной дуговой сварки под водой используют электроды диаметром 4 – 6 мм (рис. 10.6, а) из сварочной проволоки марок Св-08, Св-08А, Св-08ГА, Св-ЮГ2, а для полуавтоматической сварки – проволоки марок Св-08Г2С, ППС-АН1.

Наибольшее применение получили электроды марок ЭПС-5 и ЭПС-52, имеющие в составе покрытий ферросплавы, что улучшает химический состав и механические свойства металла шва.

Водонепроницаемость покрытия достигается пропиткой такими составами, как парафин, раствор целлулоида в ацетоне, раствор синтетических смол в дихлорэтаноле, нитролаки и др. Пропитка производится трех-, четырехкратным погружением покрытых электродов в соответствующий раствор с последующей просушкой при комнатной температуре после каждого погружения.

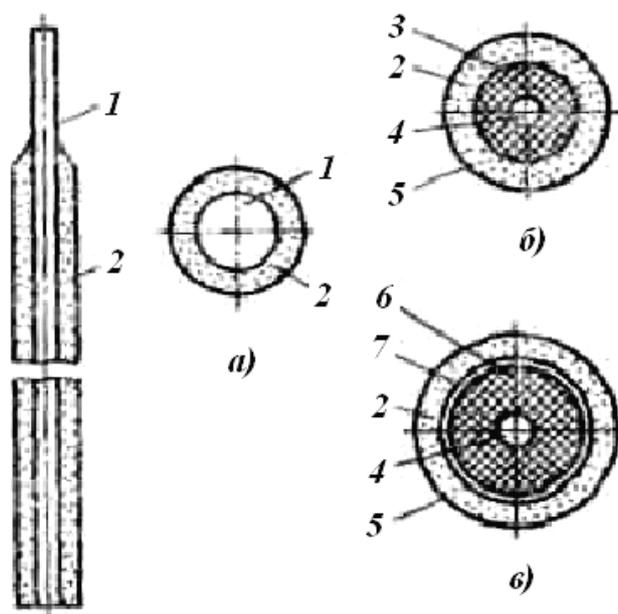


Рис. 15.2. Электроды для подводной сварки и резки:
а – плавящийся электрод для сварки; *б* – трубчатый электрод для резки;
в – карборундовый электрод для резки; 1 – металлический стержень;
 2 – покрытие; 3 – стальная трубка; 4 – канал для кислорода;
 5 – водонепроницаемое покрытие; 6 – карборундовый стержень;
 7 – металлическая оболочка

Для подводной сварки применяют специальные электрододержатели, которые имеют надежную электроизоляцию по всей поверхности.

Смена электрода производится только после отключения сварочного тока. Сварочная цепь имеет прямой и обратный кабели.

При сварке под водой выполняют соединения внахлестку, тавровые, угловые, реже стыковые, причем чаще всего способом опирающегося электрода. Горение дуги отличается в этом случае высокой стабильностью. Сварщик перемещает дугу без колебаний поперек шва с сохранением постоянного угла наклона электрода. Способом опирающегося электрода можно сваривать швы во всех пространственных положениях. Сварку в вертикальном положении производят сверху вниз, при этом электрод наклонен в сторону ведения сварки.

Техника выполнения водолазом-сварщиком сварных соединений под водой более сложна, чем на воздухе. Это связано с плохой видимостью в воде, стесненностью тяжелым и неудобным для движений водолазным снаряжением, необходимостью дополнительных затрат на преодоление течения, возможностью нарушения устойчивости сварщика на грунте, неприспособленностью человеческого организма к работе на больших глу-

бинах. Поэтому в сварных соединениях часто наблюдаются дефекты: не-
провар одной из кромок, подрезы, наплывы, поры и т. п.

Под водой хорошо сваривается малоуглеродистая сталь, удовлетво-
рительно – низколегированная сталь некоторых марок; плохо сваривается
сталь, склонная к закалке.

В практике подводных сварочных работ наибольшее распростране-
ние получила наплавка, заварка трещин в корпусе, обварка головок закле-
пок, приварка заплат, судоподъемных проушин, ребер жесткости, сварка
рулевых устройств, трубопроводов, различных подводных сооружений.

Для подводной сварки и резки разработаны и применяются полуав-
томаты типа ППСР-300-2, «Нептун». Полуавтоматом ППСР-300-2
(рис. 15.3) можно сваривать сталь толщиной 4 мм и более, резать сталь
толщиной до 25 мм на глубине до 60 м. В качестве защиты используют уг-
лекислый газ.

Полуавтомат рассчитан на номинальную силу тока 300 А. Скорость
подачи сварочной проволоки диаметром 1,2 или 1,6 мм регулируется
в пределах 6,6 – 21,6 см/с. При зарядке кассеты проволокой в количестве
4 – 5 кг сварщик может непрерывно работать 2 – 2,5 ч.

При полуавтоматической сварке дуга горит устойчиво, взвесей обра-
зуется мало, что почти не мешает наблюдению за дугой. Металл шва отли-
чается низким содержанием водорода и неметаллических включений. Вы-
сокая прочность и пластичность обеспечиваются благодаря мелкозерни-
стой структуре и отсутствию дефектов и включений.

15.2. Подводная резка

Резка металла под водой, так же как и сварка, сопряжена с трудно-
стями и опасностью для рабочего.

В подводных условиях применяют различные способы резки: *меха-
нические, термические, кумулятивные (взрывом)*. Наибольшее распростра-
нение получили способы термической (огневой) резки, электродуговая, га-
зокислородная, электрокислородная, плазменно-дуговая.

При подводной резке используется тепло концентрированных источ-
ников дуги или плазмы и тепло, выделяющееся от химического взаимодей-
ствия кислорода с металлом. Поскольку разрезаемый металл находится
в воде и интенсивно охлаждается, то источники тепла должны иметь высо-
кую концентрацию его в месте реза.

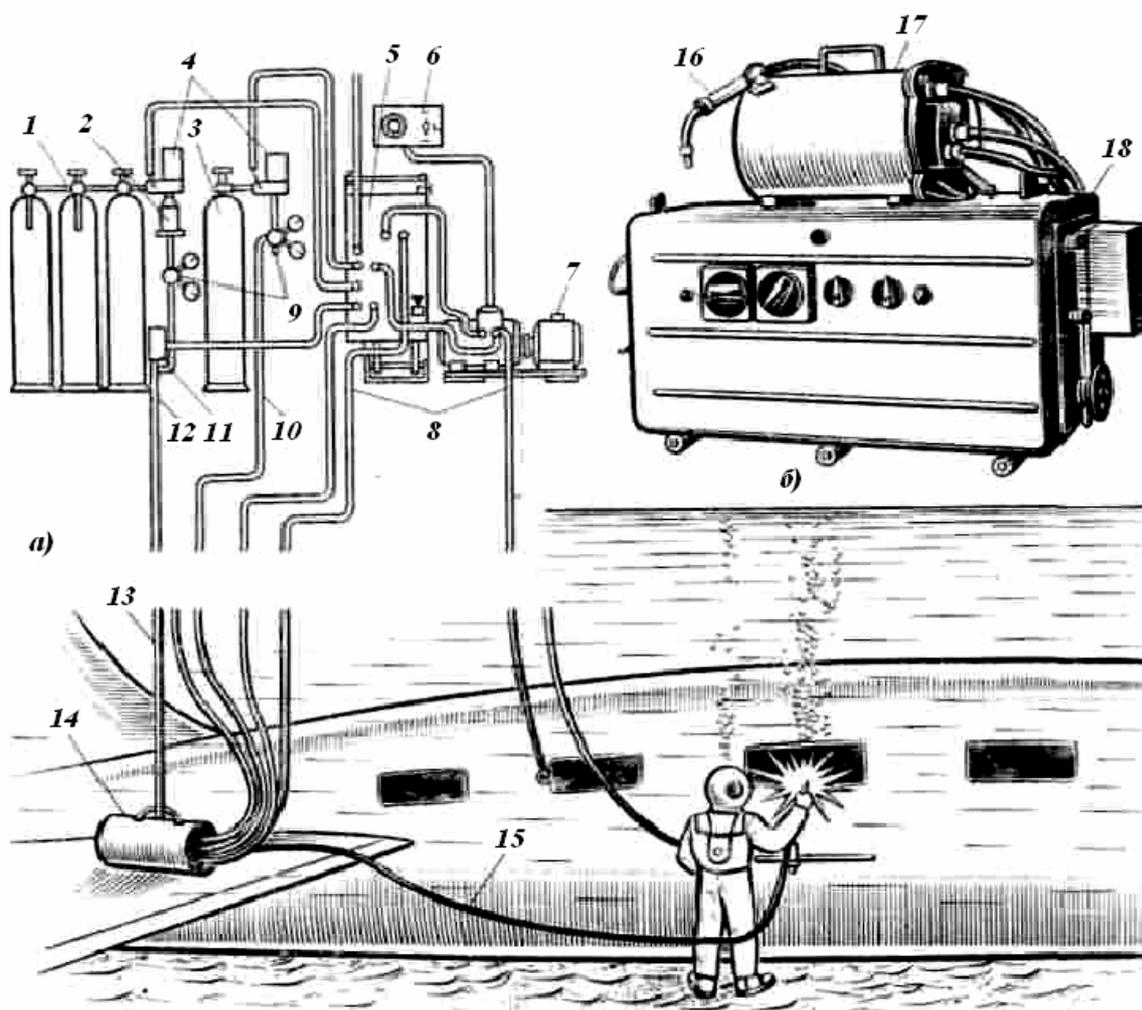


Рис. 15.3. Полуавтомат типа ППСР-300-2 для подводной сварки и резки:

а – схема полуавтомата; *б* – внешний вид полуавтомата:

1 – кислородные баллоны; *2* – осушитель кислорода;

3 – баллон с углекислым газом; *4* – подогреватели газа; *5* – шкаф управления;

6 – пульт дистанционного управления; *7* – сварочный агрегат;

8 – сварочные кабели; *9* – редукторы; *10* – шланг для подачи CO₂;

11 – электромагнитный кислородный клапан; *12* – шланг для подачи кислорода;

13 – трос для подвешивания бункера; *14* – бункер; *15* – специальный шланг-кабель;

16 – сварочная головка; *17* – механизм подачи проволоки; *18* – шкаф управления

15.2.1. Подводная электродуговая резка

Подводная электродуговая резка отличается от дуговой подводной сварки повышенными значениями сварочного тока и приемами выполнения работ. Поэтому дуговую резку под водой можно выполнять на том же оборудовании, что и подводную сварку. Целесообразно использование постоянного тока прямой полярности, так как это приводит к выделению большого количества тепла в полости реза.

Электроды для резки отличаются от электродов для сварки размерами, толщиной и составом обмазки. Электроды изготовляют из проволоки диаметром 5 – 7 мм, длиной 500 – 700 мм.

При выборе режимов тока для резки следует принимать коэффициент K равным 60 – 80 А/мм. Практикой подводных работ установлено, что электродами диаметром 5 мм можно успешно разрезать металл толщиной > 50 мм при силе тока 350 – 500 А.

Режимы резки, обеспечивающие максимальную производительность процесса, находят опытным путем.

Резка осуществляется непрерывным перемещением электрода. Она начинается с кромки или с отверстия и производится пилообразными движениями конца электрода. Металл небольшой толщины (до 10 – 15 мм) разрезается непрерывным перемещением конца электрода вдоль линии реза (рис. 15.4, а).

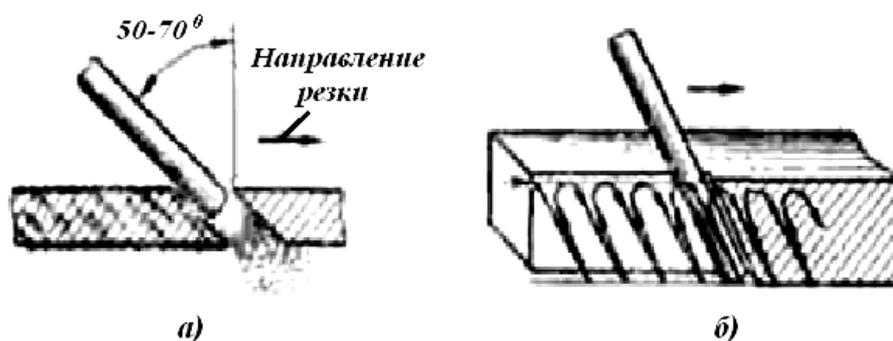


Рис. 15.4. Схемы электродуговой резки в нижнем положении:
а – металла небольшой толщины; б – металла большой толщины

При резке металла большой толщины (рис. 15.4, б) движение электрода от верхней поверхности к нижней осуществляется медленно, подъем его кверху – быстро.

15.2.2. Подводная электрокислородная резка

Способ электрокислородной резки удачно объединил преимущества дугового разряда и струи режущего кислорода. За счет тепла дуги происходит нагрев и плавление металла, а за счет струи кислорода – сгорание и выдувание металла из полости реза. В основном применяют трубчатые электроды с осевым каналом для режущего кислорода и специальные электроды из карборунда.

Стержни электродов изготовляют из толстостенной цельнотянутой трубки из малоуглеродистой стали наружным диаметром 5 – 7 мм и внут-

ренним 1,5 – 2 мм. Длина электродов 350 – 400 мм. Трубочатый электрод покрывают обмазкой толщиной 1 – 1,2 мм (см. рис. 15.2, б). Время сгорания такого электрода 1 мин.

Электроды из карборунда получили название керамических (см. рис. 15.2, в). Керамический электрод из карборунда длиной 250 мм сгорает через 15 мин. Однако из-за больших размеров (диаметр 15 – 18 мм) керамические электроды могут быть рекомендованы для резки сплошного металла толщиной до 30 мм.

Для электрокислородной резки применяют электрододержатели специальной конструкции типа ЭКД4 и ЭКД4-60 (рис. 15.5, а, б).

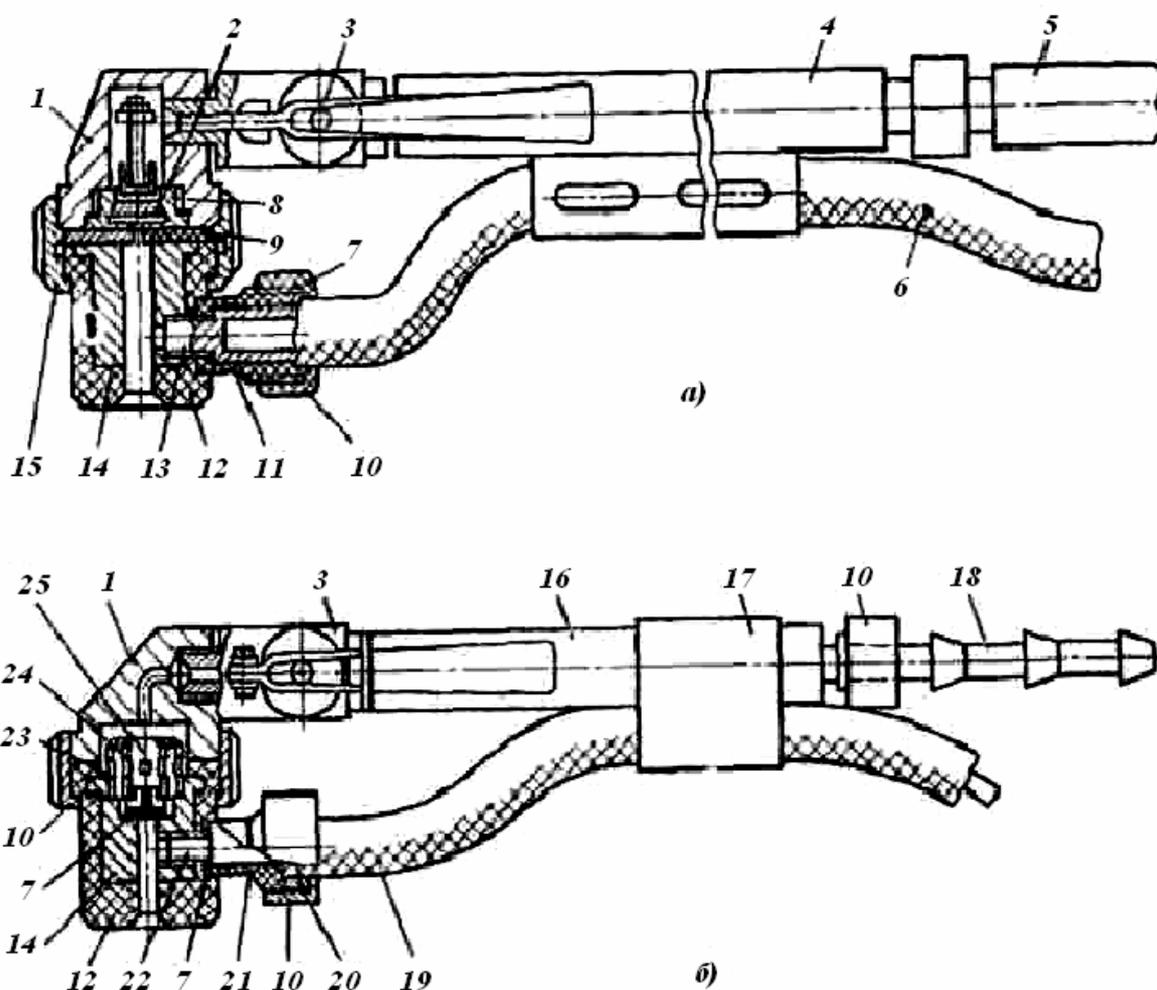


Рис. 15.5. Электрододержатели для электрокислородной резки:

- а* – тип ЭКД-4; *б* – тип ЭКД-4-60; 1 – корпус; 2 – клапан;
- 3 – кислородный клапан; 4 – рукоятка; 5 – шланг; 6 – токоведущий кабель;
- 7 – прокладки; 8 – предохранительный клапан; 9 – прокладка; 10 – гайка;
- 11 – втулка; 12 – мундштук; 13 – контакт; 14 – головка держателя; 15 – гайка;
- 16 – трубка; 17 – обойма; 18 – ниппель; 19 – кабель; 20 – шайба; 21 – втулка;
- 22 – контакт; 23 – прокладка; 24 – искро-гасительная камера; 25 – колпачок

Электрокислородную резку применяют для резки черных и цветных металлов толщиной до 100 – 120 мм на глубинах до 100 м. По производительности электрокислородная резка выше электродуговой и газокислородной резки.

Дуговая резка на полуавтомате типа ППСР-300-2 осуществляется путем непрерывной подачи проволоки и концентрического обдувания ее струей кислорода, поступающего в режущую приставку головки полуавтомата (см. рис. 15.3). Большая концентрация тепла и узкая струя кислорода обеспечивают давление кислорода 6 кгс/см со скоростью до 4 м/ч.

15.2.3. Особые способы резки металла под водой

Способ 1

Разработан способ дуговой резки углеродистой и нержавеющей стали и алюминия толщиной до 45 мм, который основан на выплавлении металла дугой, горящей между порошковой проволокой и разрезаемым металлом, с одновременной подачей в полость реза интенсивной струи воды. Резка при этом способе производится постоянным током обратной полярности на режимах: сила тока 500 – 1000 А, напряжение 20 – 40 В; давление воды 5 – 10 кгс/см²; расход воды 6 – 12 л/мин; скорость резки до 14 м/ч.

Способ 2

Для плазменно-дуговой резки разработана специализированная установка типа ОППР-1, обеспечивающая резку в пресной и морской воде. Плазменную резку металла толщиной 8 – 40 мм на глубинах до 10 м производят при силе тока 200 – 600 А и напряжении дуги 120 – 140 В со скоростью 5 – 24 м/ч. Применение плазмотронов с циркониевым катодом позволяет использовать сжатый воздух, который повышает тепловую мощность плазменной дуги и улучшает ее режущие способности. Присутствие кислорода в воздухе повышает эффективность резки стали СтЗсп.

Способ 3

Газокислородная резка основана на сгорании металла в струе кислорода и выдувании окислов и металла из полости реза.

Она возможна только при постоянном существовании газового пузыря вокруг подогревающего пламени (рис. 15.6).

Создание газового пузыря возможно за счет продуктов сгорания подогревающего пламени, для которого используют ацетилен, водород, другие углеводороды и бензин. Устойчивость пузыря обеспечивается специальной конструкцией наконечника подводного резака и подачей защитного газа – воздуха или кислорода. В воде металл интенсивно охлаждается и по-

этому для его подогрева требуется пламя в 10 – 15 раз большее, чем для аналогичных работ на воздухе.

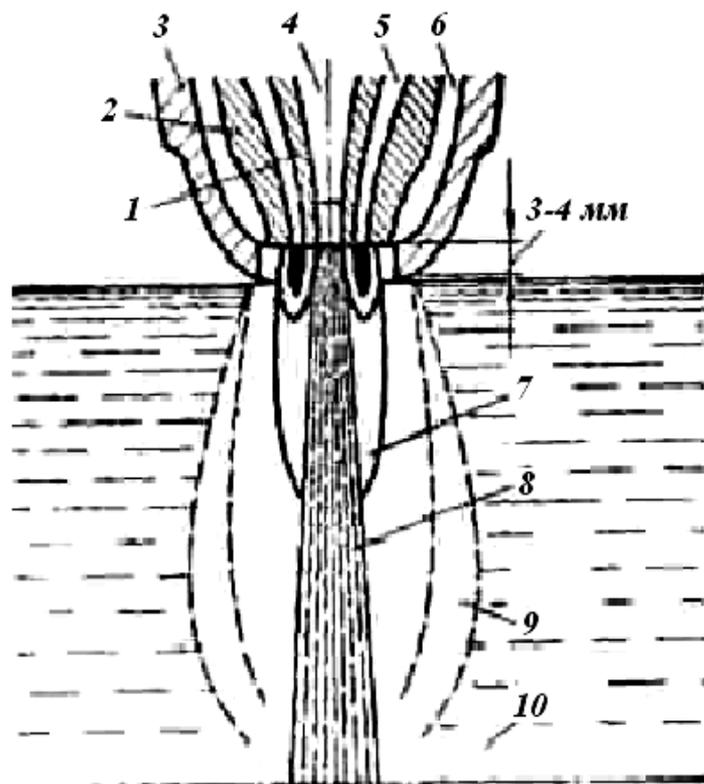


Рис. 15.6. Схема водородно-кислородной резки:
1,2 — мундштуки; 3 — колпачок; 4 — режущий кислород; 5 — горючая смесь;
6 — воздух; 7 — подогревающее пламя; 8 — струя режущего кислорода;
9 — воздушный пузырь; 10 — вода

Способ 4

Большее распространение получила водородно-кислородная резка.

Подогревающее пламя образуется за счет водородно-кислородной смеси, подаваемой по кольцевому каналу между мундштуками 1 и 2 (рис. 15.6). Между наружным колпачком 3 и мундштуком 2 подается сжатый воздух для создания пузыря и предохранения пламени от соприкосновения с водой. Режущий кислород поступает по центральному каналу мундштука 4.

Водород и кислород поступают в резак по шлангам из баллонов, а воздух по отдельному шлангу от компрессора или баллонов. На глубине 30 – 40 м водородно-кислородным резаком можно разрезать сталь толщиной до 70 мм; рабочее давление газов составляет (кгс/см²): 6,6 – кислорода, 5,5 – водорода, 5 – воздуха. Средний часовой расход водорода и кислорода 4 – 10 м³, воздуха ~ 20 м³.

Способ 5

Наибольшее распространение получила бензино-кислородная резка.

Использование бензина для подводных работ стало возможным благодаря разработке новых конструктивных принципов построения бензорезов, сущность которых состоит в том, что бензин предварительно не испаряется, а распыляется кислородом и в зону подогревательного пламени подается в виде тончайшей бензиновой пыли. Продукты сгорания пламени содержат много неконденсирующихся газов, образующих устойчивый газовый пузырь, что исключает подведение дополнительного воздуха или кислорода, упрощает и удешевляет установку и ее эксплуатацию.

Схема установки для питания резака бензином и кислородом показана на рис. 15.7.

В комплект установки входит батарея из 6 – 12 баллонов кислорода, баллоны с бензином и азотом, батарея аккумуляторов, резак и электрозажигалка. На пульте управления для понижения давления установлены два кислородных редуктора и азотный редуктор. Бензин подается под давлением азота. Бензорез за 1 ч расходует 30 – 50 м³ кислорода, 10 – 20 кг бензина; расход азота незначителен. Скорость резки бензино-кислородным пламенем выше, чем водородно-кислородным, на 20 – 30 %.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается сущность процесса подводной сварки? Какова принципиальная схема горения дуги под водой?
2. Какие применяются электроды для подводной сварки и резки?
3. Как устроено и работает оборудование при полуавтоматической сварке под водой?
4. В чем заключается сущность подводной электродуговой резки? Какие применяются схемы резки?
5. В чем заключается сущность подводной электрокислородной резки?
6. Какие вы знаете особые способы резки металла под водой?

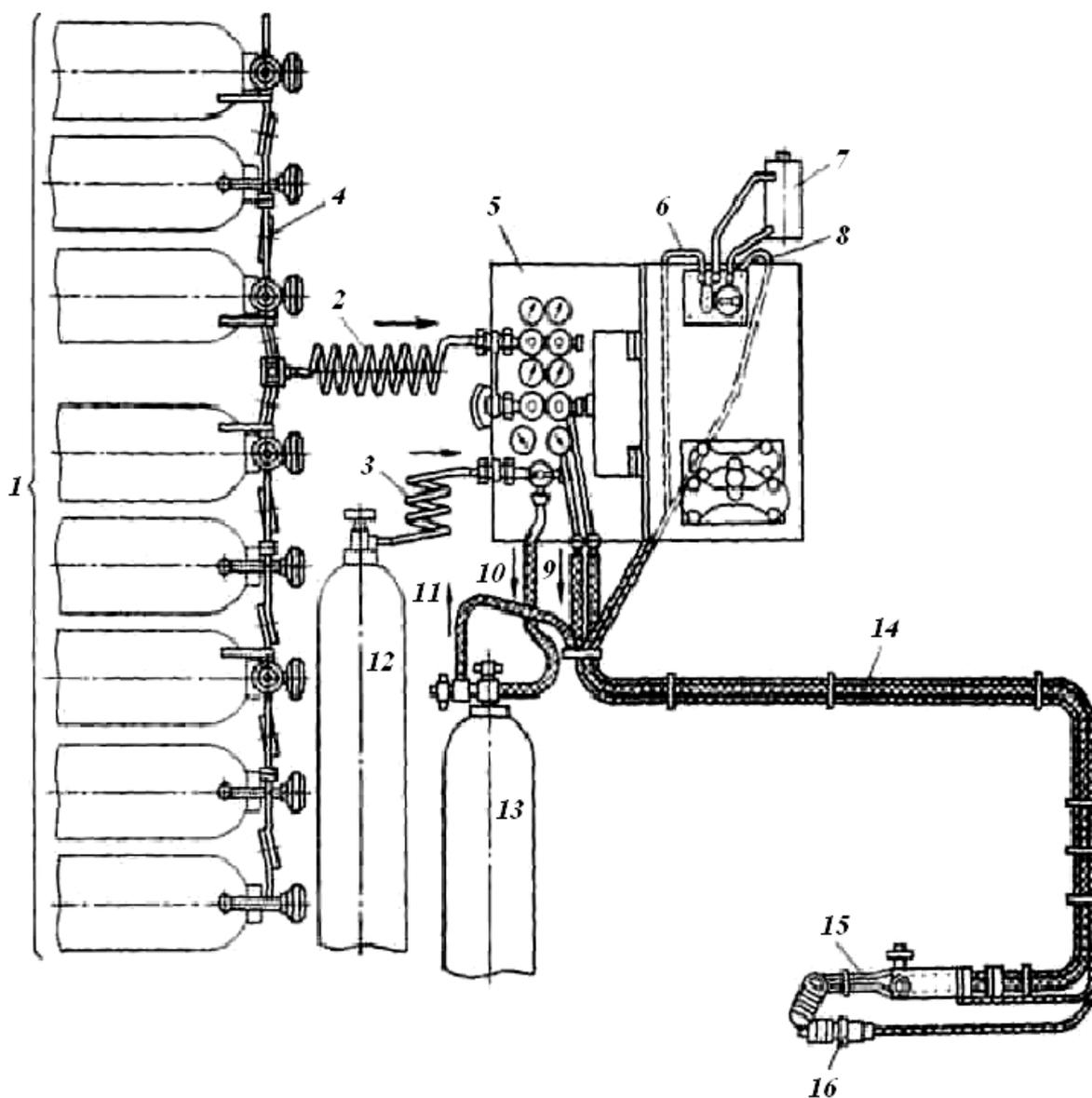


Рис. 15.7. Схема установки для подводной бензокислородной резки:
 1 – баллоны с кислородом; 2 – змеевик для кислорода; 3 – змеевик для азота;
 4 – кислородная рамка; 5 – пульт управления; 6 – к резаку;
 7 – батарея аккумуляторов; 8 – к электрозажигалке; 9 – кислород подогретый;
 10 – азот; 11 – бензин; 12 – баллон с азотом; 13 – баллон с бензином;
 14 – шланг; 15 – резак; 16 – электрозажигалка

16. АТОМНО-ВОДОРОДНАЯ СВАРКА

16.1. Сущность процесса

Плавление металла происходит за счет тепла, выделяемого при превращении атомарного водорода в молекулярный водород, и за счет тепла независимой дуги, горящей между двумя вольфрамовыми электродами.

Тепловой эффект от излучения дуги и от сгорания молекулярного водорода в наружной зоне пламени незначителен по сравнению с эффектом рекомбинации атомов водорода.

Температура атомно-водородного пламени составляет $\sim 3700^\circ\text{C}$, что по концентрации тепла приближает этот способ сварки к сварке в среде защитных газов. Водород при этом способе сварки передает тепло от дуги к изделию вначале за счет поглощения его при реакции диссоциации, а затем путем выделения при рекомбинации атомов водорода. Высокая активность водорода обеспечивает хорошую защиту металла шва от вредного воздействия кислорода и азота воздуха.

При атомно-водородной сварке дуга горит между двумя вольфрамовыми электродами, расположенными под углом (рис. 16.1).

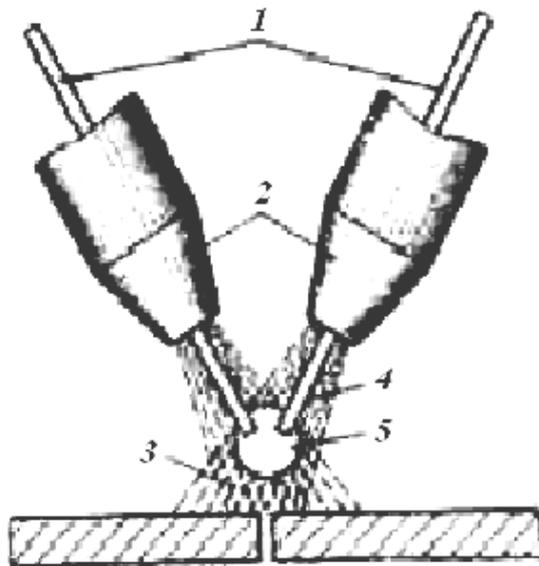


Рис. 16.1 Схема процесса атомно-водородной сварки: 1 – электроды;
2 – мундштуки горелки; 3 – зона превращения атомарного водорода в молекулярный;
4 – молекулярный водород, поступающий из мундштуков;
5 – зона диссоциации водорода на атомарный

В зону дуги можно подавать чистый водород или азотно-водородные смеси, получаемые при диссоциации аммиака. Питание дуги осуществляется от источников переменного тока. Из-за высокого охлаждающего действия реакции диссоциации водорода и высокого потенциала ионизации водорода напряжение источника питания дуги, требуемое для ее зажигания, должно быть 250 – 300 В. Напряжение горения дуги 60 – 120 В. Сила тока дуги 10 – 80 А.

Широкий диапазон изменения напряжения горения дуги мало сказывается на величине изменения силы тока. Напряжение горения дуги зависит от расхода водорода и расстояния между вольфрамовыми электродами.

Зажигание дуги осуществляется коротким замыканием вольфрамовых электродов, обдуваемых водородом, или, лучше, замыканием электродов на угольную (или графитовую) пластинку при обдувании струей газа, так как в этом случае обеспечивается легкое зажигание дуги и не требуется повышенного напряжения холостого хода источника питания. После зажигания дуги расстояние от концов электродов до поверхности изделия устанавливают в пределах 4 – 10 мм. Это зависит от мощности атомно-водородного пламени и толщины свариваемого металла.

Виды сварочной дуги при сварке

Дуга может быть *спокойной* (рис. 16.2, а), когда в дуге нет характерного веера, и *звнящей* (рис. 16.2, б), когда веер пламени касается поверхности свариваемого изделия и дуга издает резкий звук. Для спокойной дуги напряжение не превышает 20 – 50 В и расход водорода 500 – 800 л/ч, для звнящей дуги – 60 – 120 В и 900 – 1800 л/ч соответственно.

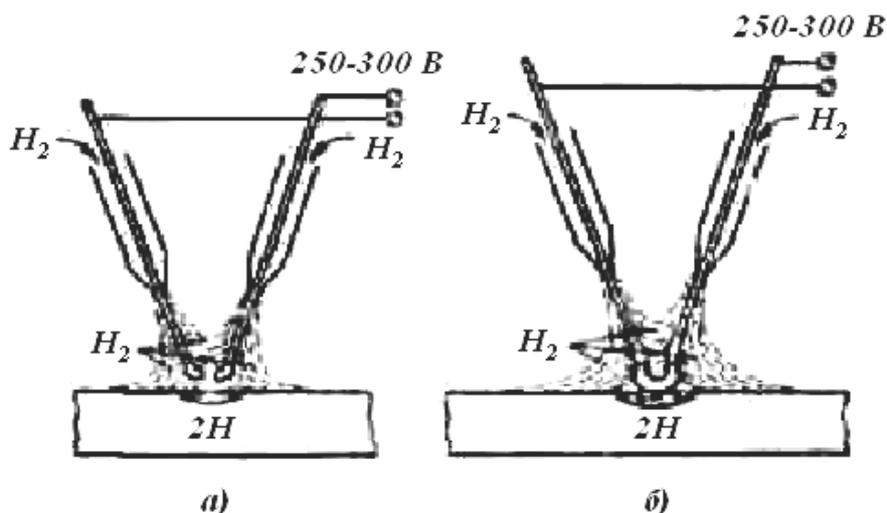


Рис. 16.2. Формы дуги: а – спокойной; б – звнящей

Техника выполнения швов при атомно-водородной сварке подобна технике газовой сварки, т. е. может быть осуществлена как правым, так и левым методами.

Атомно-водородную сварку можно осуществлять в нижнем и вертикальном положениях.

16.2. Виды сварных соединений.

Области применения атомно-водородной сварки

При атомно-водородной сварке выполняют следующие виды сварных соединений: стыковые с отбортовкой и без отбортовки кромок, угловые, тавровые и нахлесточные. Высоту отбортовки принимают равной двойной толщине свариваемого листа. Угловые соединения выполняют с применением присадочной проволоки или без нее. При сварке толщин более 3 мм на стыковых и тавровых соединениях рекомендуется выполнять скос кромок под углом $\geq 45^\circ$.

Обычно атомно-водородную сварку рекомендуется применять для сварки металлов и сплавов толщиной 0,5 ÷ 5 - 10 мм. Этим способом хорошо свариваются малоуглеродистая и легированная сталь, чугун, алюминиевые, магниевые сплавы. Хуже свариваются медь, латунь из-за склонности к насыщению водородом и испарению цинка. При сварке алюминия и сплавов на его основе необходимо применить флюсы, состоящие из солей щелочных металлов. Металлы с высокой химической активностью к водороду, например Ti, Zr, Ta и др., нецелесообразно сваривать атомно-водородной сваркой.

Атомно-водородная сварка обеспечивает получение сварных соединений со свойствами, близкими к свойствам основного металла.

Атомно-водородная сварка широко применялась в самолетостроении, химическом машиностроении и других отраслях промышленности. В настоящее время из-за значительного прогресса других способов сварки атомно-водородная сварка применяется редко.

16.3. Установки для атомно-водородной сварки

Установка для атомно-водородной сварки (рис. 16.3) состоит из атомно-водородного аппарата, баллона с водородом, водородного редуктора, горелки и пускорегулирующей аппаратуры.

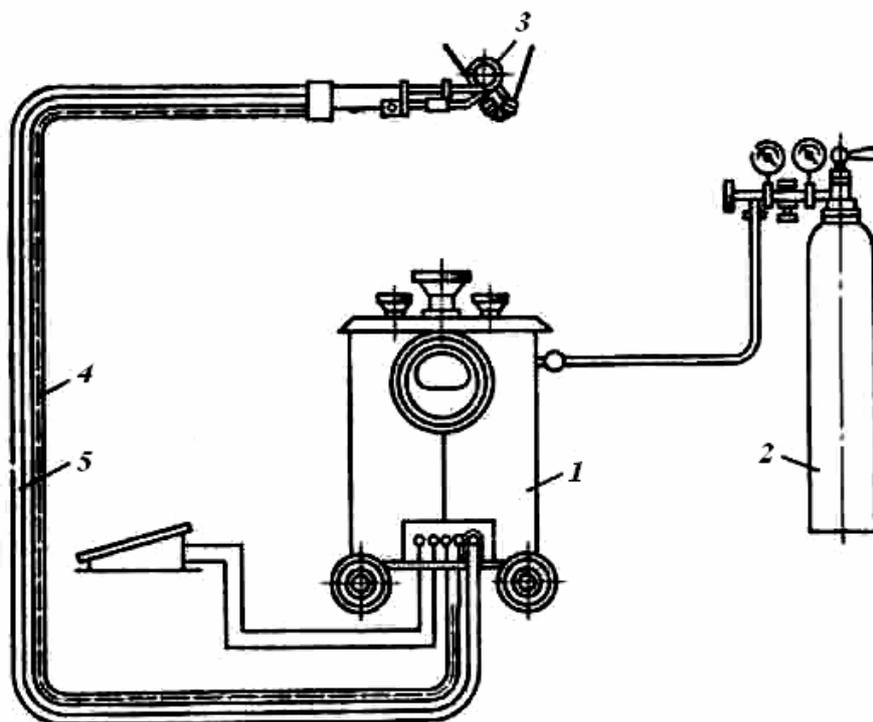


Рис. 16.3. Схема установки для атомно-водородной сварки:
 1 – атомно-водородный аппарат; 2 – баллон с водородом;
 3 – горелка; 4 – токоподвод; 5 – шланг для подачи водорода

При горении дуги в смеси водорода и азота в состав установки (рис. 16.4) входит еще баллон с аммиаком, крекер для получения азотно-водородной смеси из аммиака, аммиачный вентиль, водоотделитель и осушитель для газа.

Водород с воздухом образует взрывные смеси, поэтому все соединения трубопроводов, вентилях, шлангов должны быть надежными, а помещения, где производится работа, хорошо вентилируемые.

При соединении водорода с углеродом в условиях сварочной дуги происходит обезуглероживание металла. Поэтому в производственных условиях вместо чистого водорода применяют смеси водорода с азотом. Для расщепления аммиака на водород и азот используют аппараты-крекеры (см. рис. 16.4, а), в которых расщепление происходит при $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ в присутствии катализатора – железной стружки. Из крекера смесь газов поступает в очиститель (см. рис. 16.4, б) и далее в осушитель, где азотно-водородная смесь, пройдя слой хлористого кальция, поступает по резиновому шлангу в сварочную горелку.

Известны аппараты для атомно-водородной сварки типа ГЭ-1-2, ГЭ-2-2, АВ-40, АГЭС-75, техническая характеристика которых приведена в табл. 16.1.

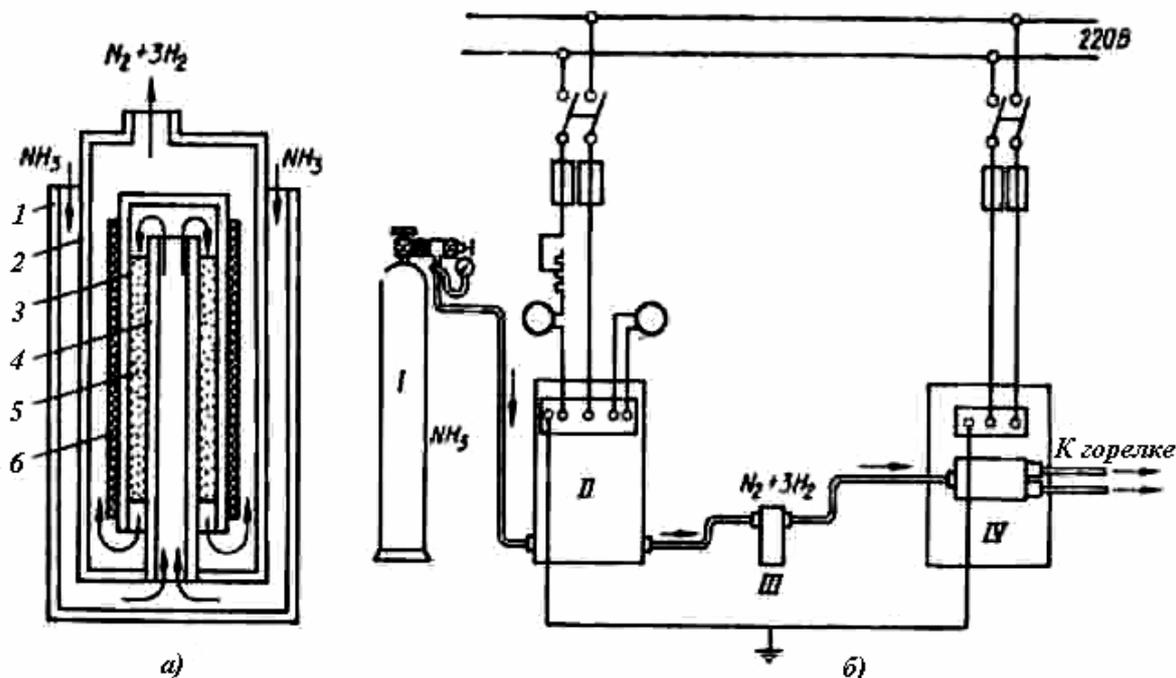


Рис. 16.4. Схемы крекера (а) и установки (б) для сварки азотно-водородной смесью:
 I — корпус; 2 — сосуд, питающий пост азотно-водородной смесью;
 3 — нагреватель; 4 — труба с катализатором; 5 — катализатор;
 б — электродвигатель; I — баллон с аммиаком; II — крекер;
 III — водоотделитель; IV — азотно-водородный аппарат

Таблица 16.1

Технические характеристики аппаратов для атомно-водородной сварки

Тип аппарата	Тип горелки	Номинальное напряжение, В	Пределы регулирования силы тока, А	Номинальная мощность, кВт
ГЭ-1-2	ГЭГ-2-2	220	30 – 83	18,3
ГЭ-2-2	ГЭГ-1-1	260	20 – 75	15,6
АВ-40	Г12-1	220	15 – 49	10,7
АГЭС-75	ГЭГ-1-1	300	20 – 100	22,5

Контрольные вопросы

1. В чем заключается сущность процесса атомно-водородной сварки? Приведите схему сварки.
2. Какие существуют виды сварочной дуги при атомно-водородной сварке?
3. Какие сварные соединения осуществляют атомно-водородной сваркой? Для чего и где применяется атомно-водородная сварка?
4. Что представляют собой установки для атомно-водородной сварки? Приведите схемы сварки.

17. ТЕРМИТНАЯ СВАРКА

17.1. Сущность процесса термитной сварки, применяемые материалы и оборудование

Источником тепла при термитной сварке являются порошкообразные смеси металлов с окислами других металлов – термиты, при сгорании которых происходит обменная реакция по кислороду с выделением значительного количества тепла (экзотермическая реакция).

Источником кислорода в термите является окисел, а источником тепла (горючим) – металл, входящий в смесь в чистом виде. Необходимым условием для получения теплового эффекта является то, что количество тепла, выделяющегося при сгорании горючего, должно быть больше, чем требуется для разложения окисла.

В качестве окислов в термитных смесях используют железную окалину, а в качестве горючих металлов – алюминий, магний. Кроме того, в термит можно вводить легирующие элементы для улучшения механических свойств термитного металла и металлический наполнитель – железную обсеckу – для увеличения выхода жидких продуктов термитной реакции (стали).

Воспламенение термитной смеси происходит при температуре не ниже 1350 °С. Для этих целей применяют термитные спички, которые имеют в головке магниевый термит, развивающий температуру при горении > 1500 °С, и другие переходные составы на основе магниевых порошков, бертолетовой соли, перекиси бария, а также электрозапальные устройства.

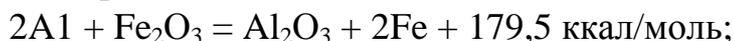
Наибольшее распространение для сварки получили, содержащие 20 – 25 % алюминиевого порошка и 75 – 80 % окалины. Физико-химические параметры термитного процесса приведены в табл. 17.1.

Таблица 17.1

Физико-химические параметры термитного процесса

Окислитель	Содержание компонентов, %					Температура процесса, °С
	До реакции		Продукты реакции			
	Al	Окисел	Fe	Al ₂ O ₃	Q, ккал моль	
Fe ₂ O ₃	25,24	74,76	52,28	47,72	179,5	2670
FeO	20	80	62,2	37,8	185,1	2260

Термохимические реакции при сгорании термита выражаются следующим образом:



При сварке стремятся применять термит с наибольшим тепловым эффектом реакции. Это резко сокращает потребность в термите.

Получению максимального теплового эффекта способствуют следующие факторы:

- высокая химическая чистота компонентов термита;
- подготовка окислителя с содержанием кислорода, по химическому составу близкого к Fe_2O_3 ;
- правильный выбор соотношения основных компонентов – алюминиевого порошка и железной окалины и весового количества.

Для изготовления сварочного термита используют *алюминиевый порошок*, содержащий 96,5 – 99,7 % Al; 0,47 % Fe; 0,36 % Si и ~1 % Al_2O_3 . Железная окалина, используемая в термите, является сложным химическим соединением, состоящим из нескольких окислов: от окиси железа Fe_2O_3 плотностью 5,1 г/см³ и температурой плавления 1565 °С до закиси железа FeO плотностью 5,7 г/см³ и температурой плавления 1420 °С. Железная окалина является в основном продуктом отходов горячей обработки стали; она прочно удерживает влагу до 550 – 600 °С.

Стальной наполнитель (гвоздевая обсечка) имеет насыпной вес 1,8 – 2,2 г/см³; кристаллизационная влага и органические включения устраняются прокаливанием при температуре > 600 °С. Плотность уплотненного (спрессованного) термита может достигать 3,2 – 3,4 г/см³. Термит воспламеняется при 1300 – 1360 °С.

Термитный металл в сварочной форме распределяется так, %: 72 – 80 на облив свариваемых деталей, 20 – 28 на литниково-выпорную систему. При термитном процессе возможно легирование металла, которое можно осуществлять через восстановитель, окислитель, металлический наполнитель, ферросплавы, легирующие окислы, введением легирующих элементов в чистом виде. Легирующие элементы, чаще всего в виде ферросплавов FeMn и FeSi, вводятся в термит обособленно в отдельных порциях или перемешиваются с шихтой.

При сварке стали необходимо подбирать по составу такой термитный металл, механические свойства которого не отличались бы от свойств свариваемой стали.

Оптимальные значения измельчения компонентов, используемых в сварочном термите, составляют, мм: 0,1 – 1,0 алюминиевого порошка; 0,05 – 1,0 железной окалины; 1,0 стального наполнителя; 0,25 – 0,63 легирующих компонентов.

Компоненты термита взвешивают с точностью $\pm 0,2$ %, а наполнитель с точностью $\pm 0,5$ %. Низкокалорийный термит развешивается на порции по 6 и 7,5 кг, высококалорийный – на порции 2,5 – 3,5 кг; 4 – 4,7 кг; 5,1 – 5,5 кг и 6,5 кг. Тигель для сжигания термита показан на рис. 17.1.

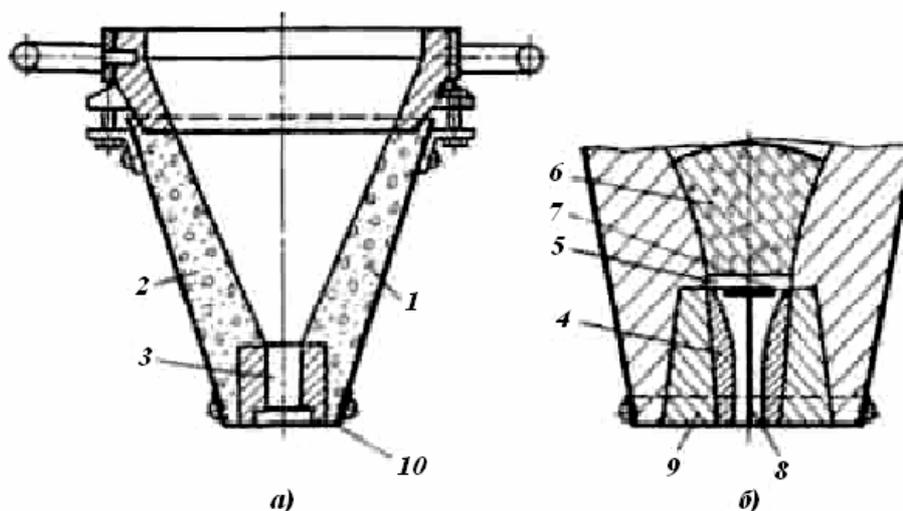


Рис. 17.1. Тигель для сжигания термита:
 а – тигель; б – дно тигля; 1 – корпус; 2 – футеровка; 3 – стакан;
 4 – втулка для выпуска расплава; 5 – магнезитовый песок; 6 – термит;
 7 – асбестовый кружок; 8 – запорный гвоздь; 9 – стакан

В пакет с термитом укладывается запорное устройство (рис. 17.1, б). В зависимости от размеров свариваемого изделия вес термитной порции может меняться от нескольких сотен граммов до нескольких килограммов. Сгорание термита происходит в тигле (рис. 17.1, а). Тигель имеет корпус из листовой стали с внутренней магнезитовой футеровкой, огнеупорную втулку (штепсель) и крышку.

17.2. Способы термитной сварки и области их применения

Для удержания жидкого металла в месте сварки применяют сварочные разъемные формы, которые могут быть сырые и сухие.

Сырые формы изготовляют на месте работ и предварительно перед сваркой их просушивают. Для изготовления сырых форм используют кварцевый песок (80 – 85 %) и глину (15 – 20 %). *Сухие* формы изготовляют из кварцевого песка (92 – 93 %) и жидкого натриевого стекла (8 – 7 %).

Литниковую систему выполняют с учетом способа подготовки стыка под сварку, разъема сварочных форм, системы газа и шлакоудаления, зазора в стыке.

Существует несколько способов термитной сварки, которые отличаются технологией процесса и применяемым оборудованием.

При использовании *термитной сварки давлением* торцы свариваемых деталей (рельсов) шлифуют и плотно прижимают один к другому, затем стык зачеканивают по всему периметру. На стык устанавливают формы (рис. 17.2, а) и через край тигля сливают вначале шлак, а затем термитный металл.

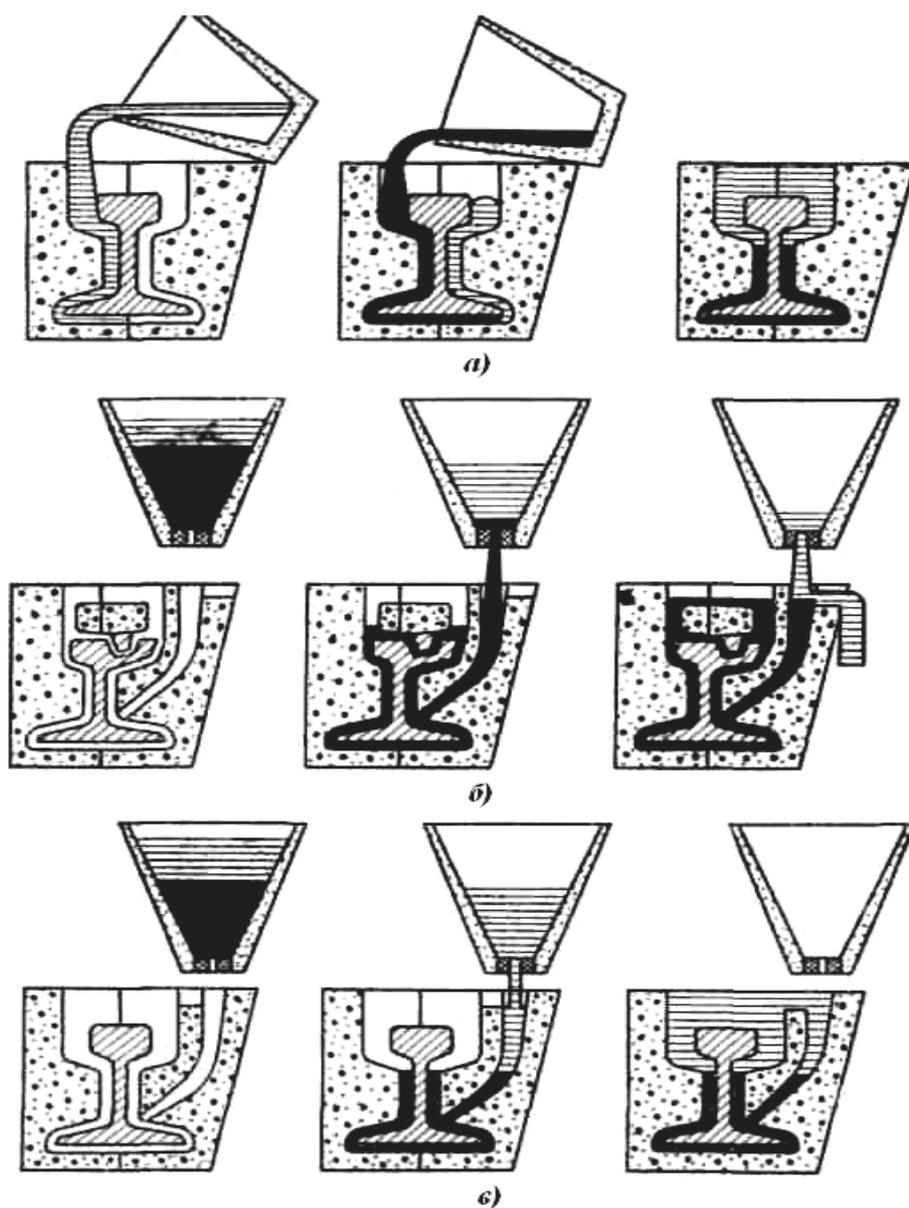


Рис. 17.2. Способы термитной сварки рельсов:
a – давлением; *б* – промежуточного литья; *в* – комбинированный

Температура стыка в начале процесса равна температуре окружающей среды, поэтому жидкий шлак быстро теряет тепло и, застывая, покрывает стык коркой толщиной до 4 мм. Выливаемый затем термитный металл вытесняет оставшийся жидкий шлак в верхнюю часть формы. Затвердевшая ранее шлаковая корка не допускает приварки термитного металла к основному металлу, однако через нее перегретый термитный металл за 3 – 4 мин нагревает стык до 1400 – 1450 °С. После нагрева производят осадку стыка сжимным прессом, затем сбивают формы и удаляют металлический облив. При этом способе сварки наблюдается значительный рост зерна, что требует при-

менения последующей термической обработки. Механические свойства сварного соединения получаются низкими. Способ термитной сварки давлением для рельсов в настоящее время почти не применяют.

Наиболее распространена **сварка способом промежуточного литья** (рис. 17.2, б). При этом способе торцы рельсов сближают и устанавливают с зазором 12 – 14 мм, стыку придают конструктивный изгиб на 1,5 – 2 мм и устанавливают две половинки сварочной формы. На головку рельса устанавливают вкладыш. Закрепленные формы и вкладыши промазывают огнеупорной глиной. В отверстие наружной половинки формы вставляют горелку для предварительного нагрева концов рельсов до 850 – 900 °С. Время нагрева составляет 15 – 30 мин в зависимости от мощности горелки и типа рельсов.

Термитный металл, расплавленный в тигле за 18 – 20 с, после выдержки 4 – 6 с выпускают в форму. Расплавленный перегретый металл оплавляет основную металл у стыка и образует с ним сварное соединение. Через 10 – 15 мин после выпуска металла формы можно снять. Этот способ также не лишен недостатков: повышенный расход термита, образование литой структуры с дефектами и значительный облив сечения стыка термитным металлом.

При **комбинированном способе** (рис. 17.2, в) головки рельсов со вставленной между ними пластиной из малоуглеродистой стали сваривают способом давления, а шейку и подошву рельсов, между которыми имеется зазор, сваривают способом промежуточного литья.

При качественном выполнении технологических операций этим способом сварки прочность стыка может достигать 80 кгс/мм². Этот способ сварки можно применять при строительстве новых линий и капитальном ремонте, но вследствие громоздкости оснастки и сложности технологии он требует тщательного подхода.

В электромонтажном производстве применяют термитно-тигельную и термитно-муфельную сварку (рис. 17.3).

Термитно-тигельная сварка (рис. 17.3, а) может быть использована для соединения стальных стержней и полос при выполнении заземляющих устройств в местах, где отсутствует электроэнергия, например при строительстве высоковольтных линий. Разработаны оборудование и технология для сварки стержней диаметром 12 – 16 мм и полос сечением 40 × 4 мм.

Термитно-муфельную сварку применяют для соединения проводов линий связи и электропередачи. При этом используют магниевый термит (25 % магния и 75 % окиси-закиси железа), который прессуют со связующим веществом в цилиндрические муфели (рис. 17.3, б, в, г).

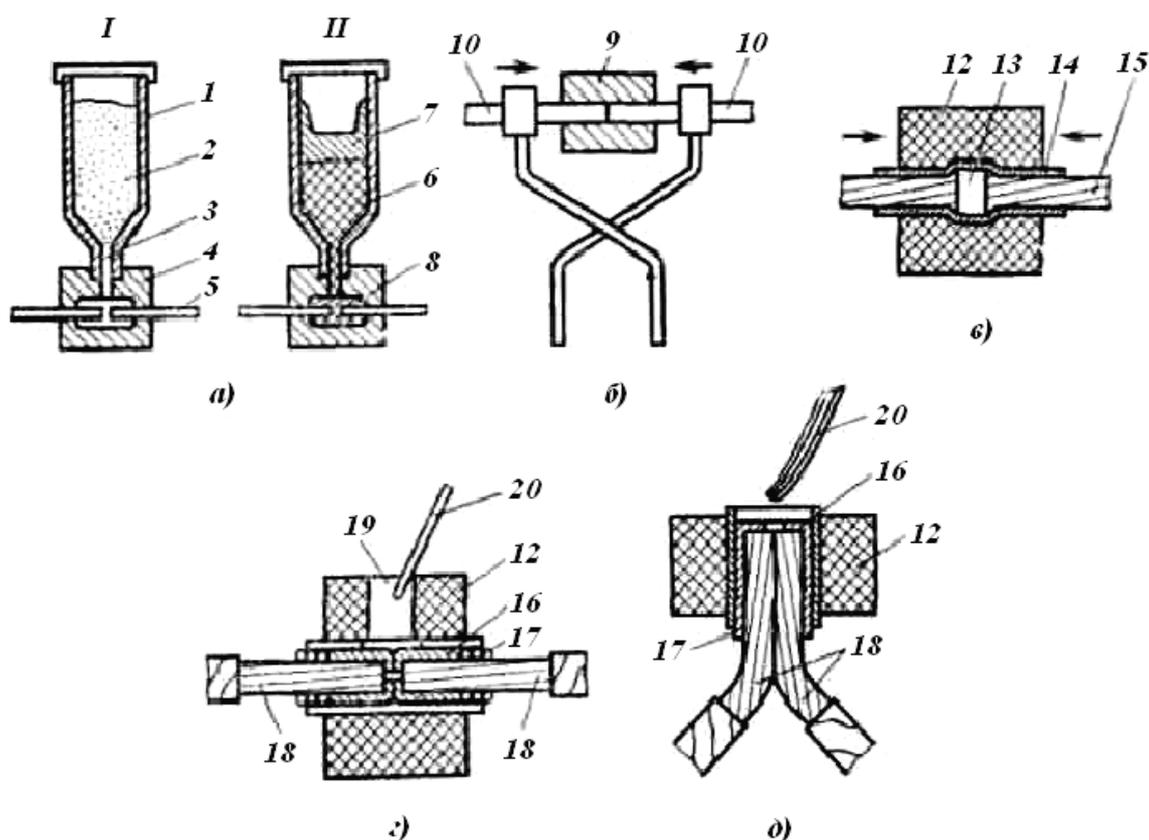


Рис. 17.3. Принципиальные схемы термитной сварки проводников и стержней:
 а) – термитно-тигельная сварка; б) – термитно-муфельная сварка;
 в) – термитно-муфельная сварка с осадкой проводов; г) – термитно-муфельная сварка с присадкой; д) – термитно-муфельная сварка по торцам; 1 – тигель; 2 – термит; 3 – литниковое отверстие; 4 – форма; 5 – стальные стержни; 6 – термитный металл; 7 – шлак; 8 – сварочное соединение; 9 – термитный муфель (шашка); 10 – провода; 11 – клещи; 12 – термитный муфель; 13 – алюминиевый вкладыш; 14 – кокиль; 15 – сталеалюминиевые провода; 16 – алюминиевый колпачок; 17 – асбестовое уплотнение; 18 – провода алюминиевыми жилами; 19 – литниковое отверстие; 20 – присадочный пруток

Сварку проводов линий связи диаметром до 6 мм производят с использованием полых цилиндрических муфтелей. Концы стальных проводов, введенные в муфель, при горении термита разогреваются, частично оплавляются и свариваются при сдавливании специальными клещами (см. рис. 17.3, б). Для соединения неизолированных сталеалюминиевых и медных проводов воздушных электролиний используют способ термитно-муфельной сварки, когда концы проводов расплавляют в формочке, заключенной в муфель, и затем сдавливают при помощи специального приспособления (см. рис. 17.3, в). Термитно-муфельную сварку кабелей и изолированных проводов с алюми-

ниевыми жилами производят без давления с введением присадочного металла в формочку через специальное отверстие (см. рис. 17.3, г). Разновидностью последнего способа является сварка по торцам двух или нескольких алюминиевых изолированных проводов (см. рис. 17.3, д).

Наибольшее применение термитная сварка нашла в городском хозяйстве при строительстве и ремонте рельсовых трамвайных путей, меньше – железнодорожных путей и железобетонной арматуры в строительстве. Термитную сварку можно применять при ремонте литых стальных и чугунных деталей. Для сварки чугуна используют термит с высоким содержанием кремния (2,5 – 3,5 %), который необходим для предотвращения отбеливания чугуна. Ведутся работы по термитной наплавке изношенных поверхностей.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается сущность процесса термитной сварки?
2. Какие применяются материалы для производства процесса термитной сварки?
3. Какие существуют факторы теплового эффекта термитной сварки?
4. Дайте характеристику сырым и сухим формам, применяемым при термитной сварке.
5. Какие существуют способы термитной сварки, и где они применяются?
6. Приведите три способа термитной сварки рельсов.

РАЗДЕЛ 4. НАНЕСЕНИЕ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

18. НАПЛАВКА МЕТАЛЛОВ

18.1. Сущность и особенности наплавки металлов

Наплавка – одна из разновидностей сварки – служит для нанесения слоя металла заданного состава на поверхность изделия. Нанесенный металл прочно связывается с основным, образуя надежное соединение.

Наплавку применяют для восстановления и упрочнения деталей машин и оборудования путем нанесения на их рабочие поверхности металлических покрытий любой толщины, любого химического состава с разнообразными свойствами (высокой твердостью и износостойкостью), слои антифрикционные, кислотостойкие, жаропрочные, кавитационностойкие и т. п. Масса наплавленного металла обычно составляет несколько процентов от массы изделия.

С помощью наплавки создают биметаллические изделия, у которых выгодно сочетаются свойства наплавленного и основного металлов. Номенклатура наплаваемых деталей весьма разнообразна по массе, форме, материалам и условиям работы. Это вызвало появление различных видов и способов наплавки, отличающихся друг от друга источниками нагрева, способом ввода легирующей присадки в покрытие, ее видом, типом защиты зоны жидкого металла, степенью механизации процесса.

В качестве источника нагрева могут применяться пламя газовой горелки, электронный луч, световой луч, плазменная струя, токи высокой частоты, электрическая дуга и др.

Особое место в сварочном производстве занимают наплавочные работы, применяемые в основном для износостойкой наплавки при ремонте изделий (87 % всех работ) и в гораздо меньшем объеме при изготовлении новых долговечных биметаллических деталей и изделий (13 %). Однако в отдельных отраслях народного хозяйства, особенно в машиностроении, наплавка новых деталей занимает значительное место. Широкое использование наплавочные работы нашли при изготовлении биметаллических деталей: лопастей гидротурбин, штампов, прокатных валов, крупного металлорежущего инструмента, опорных роликов гусеничных машин и др.

При использовании конструкций с наплавленными износостойкими слоями достигается значительное увеличение долговечности наиболее нагруженных узлов машин и механизмов. Широкое распространение наплавочные работы получили в связи с тем, что с их помощью можно создавать

значительно более дешевые биметаллические изделия с такими же или даже более высокими свойствами, чем у изделий, изготовленных из целого куска высоколегированной стали или различных сплавов.

В промышленности широко используют следующие способы наплавки: ручную дуговую плавящимся электродом, дуговую под флюсом, дуговую в защитных газах неплавящимся и плавящимся электродами. В последнее время разработан ряд новых методов наплавки, таких как вибродуговая, электрошлаковая, токами высокой частоты и др. Эти методы позволяют значительно повысить производительность труда, получить наплавленные слои с особыми свойствами, работы эти легко автоматизируются.

Технологический процесс наплавки должен обеспечивать минимальные потери электродного и дополнительного присадочного материала при максимальной производительности, которая оценивается по коэффициенту наплавки α_n или количеству металла, наплавленного в единицу времени.

Производительность различных способов наплавки покрытий приведена в табл. 18.1.

Таблица 18.1

Ориентировочная производительность различных способов наплавки

Способ наплавки	Производительность, кг/ч
Ручная наплавка покрытыми электродами	0,5...3,0
Механизированная наплавка под флюсом:	
- одним электродом	2...15
- многоэлектродная	5...30
- электродной лентой	5...30
Механизированная наплавка в углекислом газе	1,5...8,0
Механизированная наплавка самозащитной порошковой проволокой:	
- одним электродом	2...10
- двумя электродами	5...20
Механизированная наплавка порошковой лентой:	
- одним электродом	10...20
- двумя электродами	до 40
Вибродуговая наплавка	1...4
Электрошлаковая наплавка	до 150
Плазменная наплавка	до 30
Заливка жидким металлом	5...15
Наплавка погружением в расплав	10...35
Индукционная наплавка	до 20

Область применения способа наплавки зависит от его преимуществ и недостатков. При выборе технологии учитывают возможности и традиции предприятия.

18.2. Электродуговая наплавка

18.2.1. Дуговая наплавка покрытыми электродами

Электродное покрытие служит для защиты ванны жидкого металла от кислорода и азота воздуха, стабилизации дуги, повышения технологичности процесса наплавки и введения легирующих элементов в состав наплавленного металла. Дуговую наплавку покрытыми электродами, как правило, выполняют вручную.

Основными технологическими параметрами дуговой наплавки покрытыми электродами являются напряжение дуги, сила сварочного тока и скорость перемещения электрода.

Тип электрода определяют в зависимости от требуемого химического состава наплавки согласно паспортным данным изготовителя электрода, используя соответствующие каталоги. Диаметр электрода выбирают в зависимости от размеров наплавляемой детали. Затем с учетом материала детали подбирают сварочный ток.

Условно к «ручным» способам можно отнести наплавку наклонным и лежачим электродами. На рис. 18.1 показана схема наплавки наклонным электродом, который опирается на изделие и по мере оплавления способствует перемещению ванны.

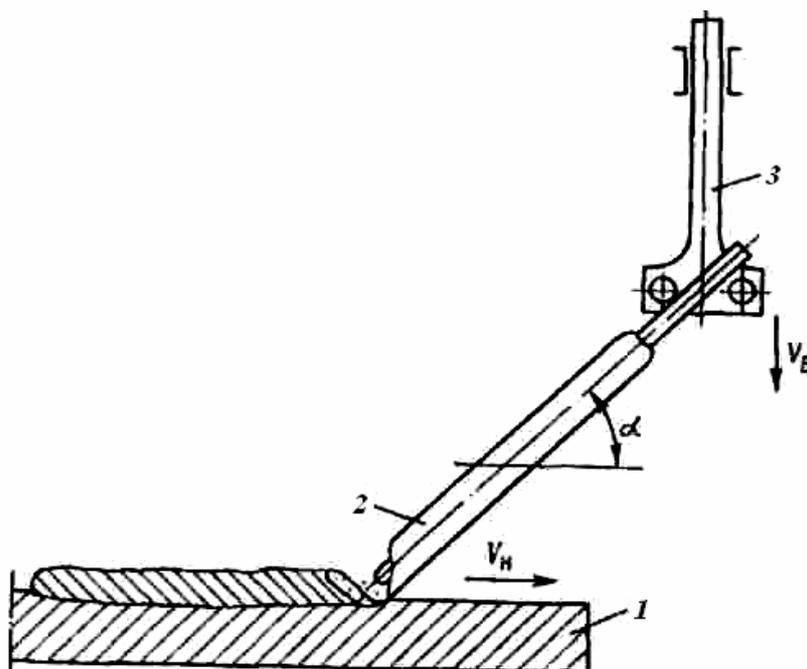


Рис. 18.1. Схема наплавки наклонным электродом:
1 – изделие; 2 – электрод; 3 – держатель

При этом не нужны какие-либо механизмы. Электрод перемещается под действием силы тяжести. Однако направление оси наплавляемых валиков является нестабильным, поэтому сложно правильно сформировать слой в целом.

Наплавку лежачим электродом осуществляют стандартными электродами, а также специальными электродами и пластинами. Для наплавки применяют электроды, покрытие которых не является токопроводящим, или принимают меры для изоляции электрода. Допускается параллельная укладка двух и более электродов. Со стороны торца возбуждают дугу путем закорачивания сердечника электрода на изделие с помощью отдельного стального или угольного стержня. Желательно применять осцилляторы, облегчающие начало процесса наплавки и повышающие устойчивость дуги. Для повышения производительности наплавки используют пластинчатые электроды.

На рис. 18.2 показана схема наплавки лежачим пластинчатым электродом, который представляет собой тонкую пластину из низкоуглеродистой или легированной стали, помещенную на слой предварительно насыпанного флюса толщиной 3... 5 мм.

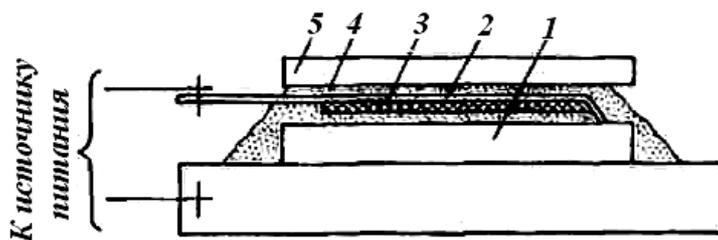


Рис. 18.2. Схема наплавки лежачим пластинчатым электродом:
1 – изделие; 2 – электрод; 3 – легирующая обмазка; 4 – флюс; 5 – медная плита

Легирование наплавленного металла осуществляют через электродный металл, за счет покрытия, нанесенного заранее на пластину, а также предварительно насыпая порошки ферросплавов. Один конец пластинчатого электрода отогнут и прикасается к поверхности изделия для возбуждения дуги. Сверху пластину засыпают флюсом толщиной 10... 15 мм, на который накладывают массивную медную плиту. После включения напряжения возникает дуга, которая блуждает в поперечном направлении. Электрод постепенно оплавляется, а сварочная ванна движется в продольном направлении. Плотность тока на пластинчатом электроде принимают 6... 9 А/мм², напряжение – 35... 45 В. Размеры и форма наплавленной поверхности определяются размером и формой пластинчатого электрода. При накоплении большого количества шлака процесс формирования слоя наплавленного металла ухудшается.

Следует отметить, что **преимуществами дуговой наплавки покрытыми электродами** являются:

1. Возможность наплавки деталей сложной формы.
2. Широкий выбор электродов с толстым покрытием.
3. Низкая стоимость и транспортабельность оборудования, позволяющая выполнять наплавку в полевых условиях.

К **недостаткам технологии** относятся:

1. Низкая производительность.
2. Нестабильность качества наплавленного металла.
3. Перерасход электродных материалов за счет разбрызгивания и остающихся огарков электродов в месте их крепления в электродержателе.

Отечественный и зарубежный опыт свидетельствует о том, что описанная технология является одной из самых распространенных, ее можно использовать при наплавке черных и цветных металлов.

18.2.2. Дуговая наплавка под флюсом

При дуговой наплавке под флюсом сварочная дуга между голым электродом и изделием горит под слоем сухого гранулированного флюса толщиной 20... 40 мм с размером зерен 0,5... 3 мм в поперечнике (рис. 18.3).

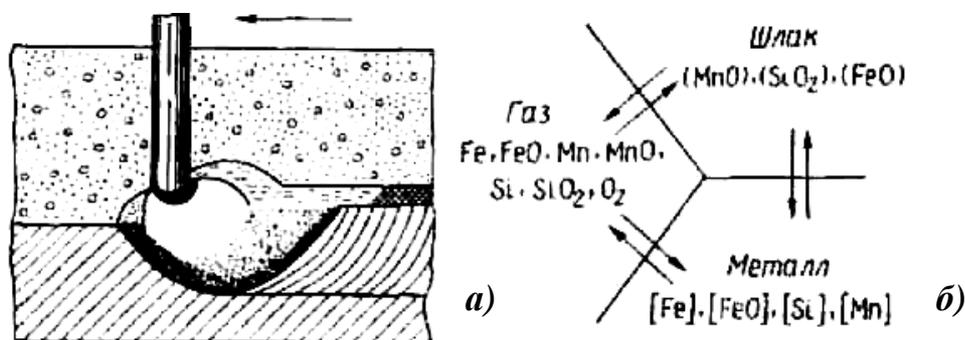


Рис. 18.3. Схема взаимодействия металла с газами и шлаком при механизированной наплавке пюя флюсом:
 а) – продольный разрез сварочной ванны;
 б) – схема взаимодействия металл – шлак – газ

Одновременно плавятся сварочная проволока, основной металл и флюс. При плавлении часть легирующих компонентов выгорает. Жидкий металл в сварочной ванне постоянно движется и перемешивается. Металл сварочного шва, полученного под флюсом, состоит из расплавленного присадочного металла (1/3) и переплавленного основного металла (2/3). Отношение массы расплавленного флюса к массе расплавленного присадочного металла составляет $\sim 1:1$. Использование флюса обеспечивает

уменьшение разбрызгивания и угара металла, позволяет применять ток большей плотности, чем при ручной наплавке покрытыми электродами; замедляет процесс затвердевания металла; создает благоприятные условия для выхода газов из шва; уменьшает потери тепла сварочной дуги на излучение и нагрев потоков окружающего воздуха.

Электродным материалом для наплавки под слоем флюса служат проволоки сплошного сечения (углеродистая, легированная и высоколегированная), порошковые проволоки (легированная и высоколегированная). Для повышения производительности процесса используют также ленточные электроды (стальная, спеченная, металлокерамическая и порошковая лента).

Основными технологическими параметрами наплавки являются состав флюса и электродного материала; напряжение дуги; сила и полярность тока; скорость наплавки и подачи электродного материала; шаг наплавки; смещение электрода с зенита; диаметр и вылет электрода.

Марку флюса и электродного материала выбирают с учетом требуемых физико-механических свойств наплавленного покрытия.

С повышением напряжения дуги (при постоянных токе и скорости наплавки) увеличивается ширина наплавленного валика, повышается количество расплавленного флюса, т. е. его расход. При низком напряжении дуги получается высокий узкий валик.

Сварочный ток определяет глубину проплавления основного металла и производительность процесса. С увеличением тока (при постоянных скорости наплавки и напряжения) возрастают объем жидкой ванны, глубина и площадь проплавления металла, что приводит к увеличению высоты наплаваемого валика. Однако при дальнейшем повышении тока формирование наплаваемого валика ухудшается, отсутствует плавный переход от поверхности наплавленного металла к основному. Появляется опасность деформации детали, уменьшается концентрация легирующих элементов в наплавленном слое, так как доля основного металла в нем повышается. Чем меньше диаметр детали, тем меньше должны быть ток и диаметр электродной проволоки.

Ток выбирают в зависимости от диаметра электродной проволоки и регулируют скоростью ее подачи. Для уменьшения проплавления основного металла применяют ток обратной полярности.

Замена одноэлектродной наплавки многоэлектродной позволяет повысить производительность процесса в 1,5 – 2 раза, более рационально использовать легирующие элементы проволоки и флюса за счет длительного взаимодействия расплавленного металла и флюса. Металл, нанесенный многоэлектродной наплавкой, после термической обработки по износостойкости на

12... 13 % превосходит металл, наплавленный одним электродом, что объясняется высоким содержанием легирующих элементов в металлопокрытии. Схема многоэлектродной наплавки показана на рис. 18.4. Блуждающая дуга горит между деталью 7 и ближайшим к ней электродом 1.

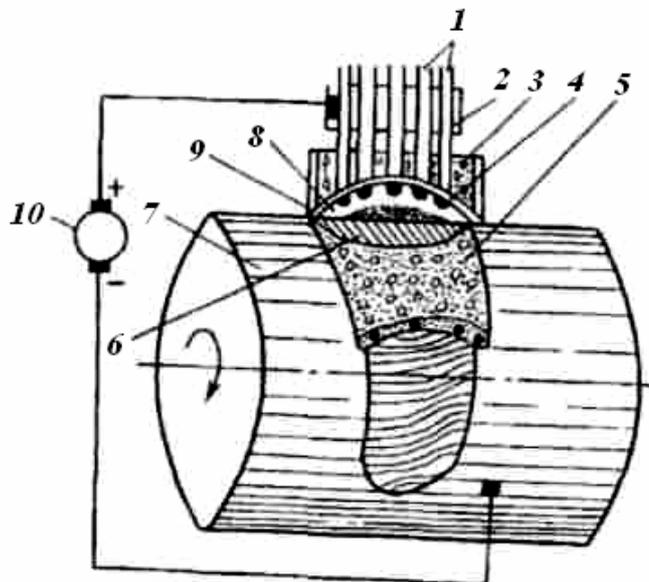


Рис. 18.4. Схема многоэлектродной наплавки: 1 – электроды; 2 – токопроводящий контакт; 3 — флюс; 4 — дуга; 5 — шлаковая корка; 6 — наплавленный металл; 7 — деталь; 8 — газовый пузырь; 9 — эластичная оболочка из расплавленного флюса; 10 — источник тока

Таким образом, **преимуществами наплавки под флюсом** являются:

- производительность процесса, возросшая в 6 – 8 раз по сравнению с наплавкой покрытыми электродами за счет механизации, уменьшения потери тепла, увеличения силы тока;
- гарантия наплавки с заданным химическим составом и физико-механическими свойствами наплавленного слоя (качество наплавки не зависит от квалификации сварщика);
- возможность получения наплавленного слоя значительной толщины (1,5... 8 мм);
- уменьшение расхода электродного материала благодаря устранению потерь на разбрызгивание, угар, огарки (не более 3 %);
- облегчение условий труда, так как процесс механизирован и отсутствует излучающее действие дуги.

К недостаткам этой технологии относятся:

- большой прогрев детали и значительная зона термического влияния с нарушением термообработки примыкающих к наплавке участков детали (возможно коробление изделия);

- проблема удержания ванны расплавленного металла и флюса при наплавке деталей цилиндрической формы (наплавку деталей диаметром менее 50 мм не проводят);
- отсутствие возможности получения покрытия толщиной менее 1,5 мм;
- необходимость удаления шлаковой корки, которая может способствовать прекращению горения дуги при наплавке смежных валиков;

Благодаря преимуществам механизированная наплавка под флюсом является самой распространенной.

18.2.3. Наплавка открытой дугой

Применение при дуговой наплавке флюса связано с определенными технологическими трудностями, что усложняет механизацию и автоматизацию процесса. При использовании порошковой проволоки или ленты можно, изменяя состав наполнителя отказаться от флюса и защитных газов, так как газы и шлак, образующиеся при плавлении порошкообразных компонентов шихты проволоки или ленты, могут защитить жидкий металл от воздействия атмосферы и повысить стабильность процесса наплавки.

Сердечник порошковой проволоки для наплавки под флюсом содержит преимущественно легирующие элементы, а для наплавки открытой дугой – материалы, образующие газы и шлаки, которые защищают зону дуги от кислорода и азота воздуха.

Порошковая проволока с внутренней защитой обеспечивает легирование наплавленного металла в широких пределах. При этом в наплавленном слое содержится большое количество легирующих элементов, способствующих его самозакаливанию на воздухе. Некоторые свойства металла, наплавленного открытой дугой с применением порошковой проволоки, рассмотрены в табл. 18.2.

Таблица 18.2

Некоторые свойства наплавов порошковой проволокой с внутренней защитой

Марка порошковой проволоки	Твердость HRC	Относительная износостойкость
ПП-У30Х14СМФ-0	46,5...51,5	2,23
ПП-У25Х17Т-0	43,5...45,5	2,30
ПП-3Х13-0	55...57	1,79
ПП-1Х14-0	43,5...49,5	1,43
ПП-25Х5МФС-0	51,5...55	1,77
ПП-3Х5Г2М-0	49,5...50,5	1,78
ПП-ПЗН4-0	35,5...36,5	1,33
ПП-ТН250-0	27...29	1,05

Наплавка открытой дугой порошковой проволокой имеет следующие преимущества:

- простота оборудования и технологии;
- отсутствие необходимости применять защитный газ и флюс;
- возможность наплавки в полевых условиях (ветер практически не влияет на процесс наплавки);
- сравнительная простота введения легирующих элементов в наплавленный металл, состав которого можно регулировать в широких пределах.

Для процесса наплавки этим способом характерно обильное выделение дыма. Эта проблема решена с помощью дымового коллектора.

18.2.4. Наплавка в среде углекислого газа

Процесс наплавки в среде защитных газов отличается тем, что в зону горения электрической дуги под давлением подается защитный газ, и столб дуги, а также расплавленная сварочная ванна изолируются от кислорода и азота воздуха. Для создания защитной атмосферы используют пищевую углекислоту или сварочный углекислый газ, чистый аргон. Расход газа составляет 0,6... 0,96 м³/ч.

Наиболее распространена наплавка в среде углекислого газа плавящимся электродом (рис. 18.5).

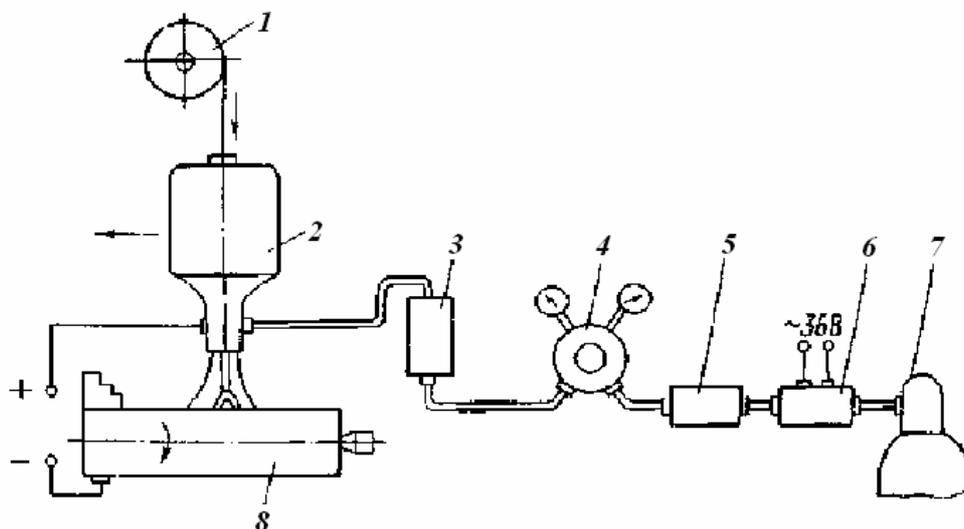


Рис.18.5. Принципиальная схема установки для дуговой наплавки в среде углекислого газа: 1 – катушка с проволокой; 2 – наплавочный аппарат; 3 – ротаметр; 4 – редуктор; 5 – осушитель; 6 – подогреватель; 7 – баллон с углекислым газом; 8 – деталь

Она в 1,2 – 1,5 раза экономичнее наплавки под слоем флюса, а производительность при этом на 25 – 30 % выше. Наплавка в CO₂ обеспечивает хорошее формирование шва, наплавленный металл получается плотным, зона термического влияния невелика. Благодаря последнему преимуществу этот способ применяют для наплавки нежестких деталей малого диаметра (например, 10 мм).

Питание углекислым газом осуществляют по схеме баллон – подогреватель – осушитель – понижающий редуктор – ротаметр – наплавочный аппарат (горелка). Подогрев и осушение углекислого газа необходимы для предотвращения возможной закупорки льдом отверстий в редукторе вследствие расширения газа и увеличения влажности. Для снижения давления CO₂, подаваемого в зону дуги, с 5,0... 5,5 до 0,05... 0,20 МПа используют понижающий редуктор с манометрами высокого и низкого давления. По шкале ротаметра определяют расход газа.

Известны *два варианта механизации* анализируемой наплавки.

В первом случае механизированы все действия, включая подачу CO₂ и электродной проволоки, относительное перемещение горелки и наплавляемой детали. *Во втором* – механизирована подача CO₂ и электродной проволоки, а относительное перемещение горелки и наплавляемой детали осуществляют вручную.

Сварку (наплавку) в углекислом газе, как правило, проводят при постоянном токе обратной полярности с жесткой внешней характеристикой источника тока.

Основными технологическими параметрами наплавки в среде CO₂ являются:

- состав электродного материала;
- напряжение дуги;
- сила и полярность тока;
- скорость наплавки и подачи электродного материала;
- шаг наплавки;
- диаметр и вылет электрода;
- расход защитного газа.

Состав электродного материала выбирают с учетом требуемых физико-механических свойств наплавленного покрытия.

На ряде предприятий для восстановления деталей машин используют автоматическую наплавку в среде углекислого газа с направленным охлаждением. Сущность способа заключается в том, что на наплавленный в среде углекислого газа металл (температура его должна быть равна или выше темпера-

туры закалки) подается охлаждающая жидкость (5 %-ный раствор кальцинированной соды в воде), которая обеспечивает закалку нанесенного слоя. Изменяя место подвода охлаждающей жидкости в зависимости от химического состава электродной проволоки можно регулировать твердость наплавленного металла в пределах 27... 51 HRC (без дополнительной термообработки).

Наплавка в среде углекислого газа занимает ведущее место среди других способов наплавки. Это объясняется ее существенными *преимуществами*:

- хорошим формированием шва (наплавленный металл – плотный);
- интенсивным отводом тепла из зоны сварки (деталь нагревается незначительно, что обеспечивает возможность наплавки тонкостенных и нежестких изделий без деформации и разрушения);
- высокой производительностью процесса в связи с отсутствием потерь тепла на плавление флюса (на 25... 30 % выше, чем при наплавке под флюсом);
- экономичностью, простотой конструкции оборудования;
- отсутствием необходимости удаления шлаковой корки, дестабилизирующей горение дуги.

Недостатками технологии наплавки в среде CO_2 являются:

- разбрызгивание металла;
- сравнительно низкие твердость и износостойкость наплавки, так как легирование наплавленного металла через флюс не имеет места;
- окисляющее действие CO_2 требует применения специальной проволоки, легированной кремнием и марганцем;
- необходимость транспортировки баллона с CO_2 ;
- необходимость защиты сварщика от излучения электрической дуги.

18.2.5. Наплавка в среде инертного газа

Процесс наплавки в среде инертного газа состоит в дуговой наплавке при защите зоны дуги аргоном, гелием или другим инертным газом. Наплавку в среде инертного газа осуществляют плавящимся и вольфрамовым электродами.

Наплавка плавящимся электродом отличается тем, что дуга возникает между основным металлом и электродным наплавочным материалом. Процесс протекает в условиях автоматической подачи электродной проволоки. В качестве защитного газа чаще всего используют аргон, хотя в среде чистого аргона дуга теряет стабильность при наплавке любого материала, кроме алюминиевых сплавов. Для стабилизации дуги при наплавке стали к аргону добавляют до 20 % кислорода или углекислого газа, что суще-

ственно влияет на глубину проплавления поверхности основы и свойства наплавленного металла. Поэтому для того, чтобы получить металл с заданными свойствами, необходимо тщательно выбирать состав защитного газа.

При наплавке вольфрамовым электродом дуга, за счет теплоты которой происходит плавление наплавочного присадочного металла, возникает между основным металлом и вольфрамовым электродом. Аргонодуговая наплавка, сходная с газовой, проводится при подаче наплавочного прутка и его плавлении дугой. Применение механизированных средств подачи наплавочного материала с постоянной скоростью позволяет осуществлять наплавку в автоматическом или полуавтоматическом режиме.

Применение инертного газа исключает необходимость использования флюса, поэтому этот способ особенно эффективен при наплавке цветных металлов, высоколегированных сталей и других материалов, чувствительных к окислению и азотированию. Высокое качество наплавленного металла обеспечивается при широком выборе наплавочных материалов. Стабильная дуга колоколообразной формы образуется в широком диапазоне силы тока, что обеспечивает формирование сварочной ванны и ровный валик наплавленного металла с гладкой поверхностью. Этот способ по производительности уступает наплавке плавящимся электродом из-за высокой концентрации энергии и низкой эффективности использования теплоты дуги.

18.2.6. Вибродуговая наплавка

Основными особенностями вибродуговой наплавки являются вибрация электродной проволоки и подача охлаждающей жидкости в зону горения дуги (частота колебаний проволоки вдоль оси 50... 100 1/с, амплитуда 1... 3 мм).

Вибрация обеспечивает стабильность дуги за счет использования энергии электродвижущей силы самоиндукции при размыкании электрода и детали (напряжение источника тока 14... 20 В, однако в момент размыкания электрода и детали за счет ЭДС самоиндукции оно возрастает до 30... 35 В, что облегчает зажигание дуги). Кроме того, вибрация позволяет осуществить мелкокапельный перенос наплавляемого металла.

Вибродуговую наплавку (рис. 18.6) проводят с помощью автоматической головки, которую устанавливают вместо резцедержателя на суппорте токарного станка.

Основание головки изолируется от плиты суппорта станка текстолитовыми прокладками и втулками, станок заземляется. Наплавляемая деталь 3, закрепленная в патроне или в центрах станка, вращается с определенной скоростью. Сварочный ток к обрабатываемой детали подводится

токоподводящим устройством. Для этого на шпиндель станка напрессовывают медное кольцо, к станине привинчивают траверсу со щеткодержателем и щеткой. Как и при других технологиях наплавки, для минимального проплавления основного металла рекомендуется ток обратной полярности.

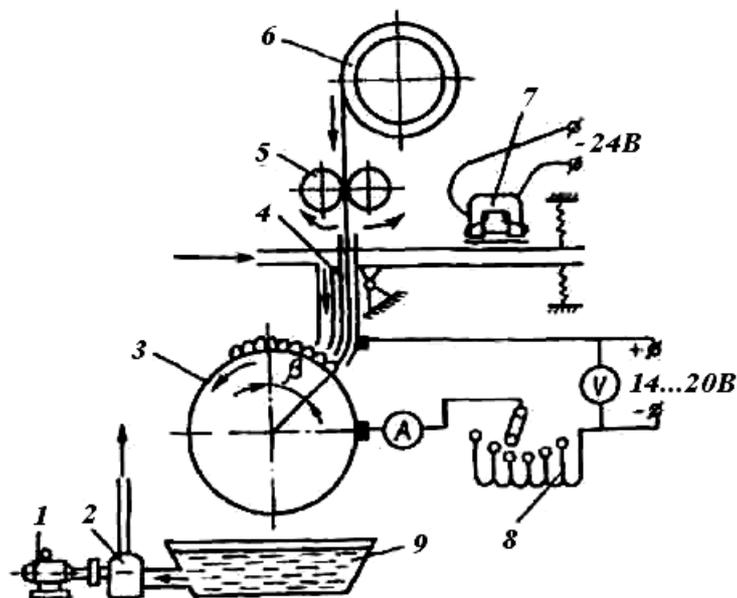


Рис. 18.6. Принципиальная схема вибродуговой наплавки:

- 1 – электродвигатель; 2 – насос; 3 – наплавляемая деталь;
 4 – вибрирующий мундштук; 5 – механизм подачи проволоки; 6 – кассета;
 7 – вибратор; 8 – индуктивное сопротивление; 9 – бак для жидкости

Автоматическая вибродуговая головка с мундштуком 4 предназначена для подачи электродной проволоки и отрыва ее от детали. Проволока из кассеты 6 подается механизмом 5, который состоит из роликов, редуктора и электродвигателя. Электрод вибрирует с помощью электромагнитного или механического вибратора 7. Более надежно работают механические вибраторы, например эксцентриковые.

Охлаждающая жидкость подается в зону наплавки насосом 2, для этого применяют 3... 5 %-ный водный раствор кальцинированной соды с добавлением 0,5 % машинного масла или 10... 20 %-ный водный раствор технического глицерина. С помощью охлаждающей жидкости осуществляют закалку наплавленного слоя без дополнительной термообработки; защиту расплавленного металла от кислорода и азота воздуха путем превращения жидкости в пар и вытеснение воздуха из зоны горения дуги; предотвращают нагрев детали, которая в процессе наплавки практически остается холодной.

Режим наплавки характеризуется величиной тока, скоростью наплавки и подачи электродной проволоки, шагом наплавки, расходом охлаждающей жидкости, частотой вибрации электрода и т. д.

Необходимую твердость наплавленного покрытия получают, применяя проволоку соответствующего химического состава

Преимущества вибродуговой наплавки:

- путем подбора электродной проволоки получают покрытия высокой твердости и износостойкости без дополнительной термообработки;
- детали не деформируются и не нагреваются в процессе наплавки;
- производительность процесса в 4 – 5 раз выше, чем ручной дуговой наплавки;
- благодаря току низкого напряжения увеличивается безопасность проведения работ.

Наряду с положительными вибродуговая наплавка имеет и ***отрицательные стороны.***

– Снижается прочность наплавленных деталей при переменных нагрузках, что объясняется образованием закалочных структур и возникновением растягивающих напряжений в полученных покрытиях. Поэтому детали машин, испытывающие при эксплуатации переменные нагрузки и склонные к поломке из-за усталости, восстанавливать вибродуговой наплавкой не рекомендуется.

– Неоднородная твердость наплавленного слоя, которая предопределяется перекрытием валиков (швов). В месте перекрытия твердость снижается вследствие отпуска ранее нанесенного металла.

18.3. Электрошлаковая наплавка

В процессе электрошлаковой наплавки ток проходит от электрода к детали через жидкий шлак, в результате выделяется тепло. Температура шлаковой ванны выше, чем температура плавления присадочного материала электрода. Присадочный металл расплавляется, оседает и формируется охлаждаемым кристаллизатором, который придает нанесенному слою нужную форму.

По сравнению с дуговым процессом при ЭШН расход электроэнергии в 1,5... 2 раза, а флюса в 20 раз меньше. Наличие ванны жидкого шлака высотой 20... 60 мм облегчает всплывание газовых пузырьков, частиц шлака и удаление их из металла. Поэтому при ЭШН склонность к образованию пор и других неплотностей значительно ниже, чем при дуговой. Вследст-

вие благоприятного направления роста кристаллов в наплавленном металле, полученном электрошлаковым способом, значительно снижается склонность к образованию кристаллизационных трещин. Этому также способствуют более низкие скорости нагрева и охлаждения околошовной зоны, кристаллизации ванны жидкого металла.

С помощью ЭШН возможно наплавлять как толстые слои практически неограниченных размеров с принудительным формированием, так и тонкие толщиной до 3... 5 мм, при свободном формировании наплавленного металла. Процесс используется для наплавки на плоскость по сложному, в том числе пространственному контуру и для торцевой наплавки. Наплавляют плоские, цилиндрические, конические наружные и внутренние поверхности. Возможна также наплавка поверхностей сложной формы. Способ позволяет без особых затруднений наплавлять слои с изменявшимися по длине и ширине химическим составом, и свойствами по заранее заданному закону.

Электрошлаковый процесс может устойчиво протекать как на переменном, так и на постоянном токе прямой или обратной полярности. В связи с тем, что тепловая инерция шлаковой ванны велика, низкочастотные (от нескольких Герц и более) изменения напряжения и даже кратковременные отключения сварочного тока практически не ухудшают устойчивости электрошлакового процесса. С этой точки зрения требования к источникам питания для электрошлаковой сварки и наплавки менее жестки, чем для дуговой. Источники питания, применяемые для дуговой сварки, могут быть использованы и для электрошлаковой наплавки. Однако более стабильный процесс можно получить, используя специализированные источники питания с низким напряжением холостого хода, жесткой или пологопадающей внешней характеристикой. Такие источники питания отличны от источников питания с падающими характеристиками, имеют более высокие коэффициенты полезного действия и мощности.

В настоящее время существуют различные способы электрошлаковой наплавки, классификация которых представлена на рис. 18.7.

Легирование металла при ЭШН может осуществляться через плавящийся электрод или путем введения некомпактного материала в шлаковую ванну. К некомпактным материалам относятся: порошок, зернистый материал, дробленые пластины металлокерамических сплавов, стружка, дробь и др.



Рис. 18.7. Классификация способов электрошлаковой наплавки

Использование данных присадок при различных способах электрошлаковой наплавки возможно с использованием плавящегося, неплавящегося или секционнно-неплавящегося электрода.

На рис. 18.8 – 18.14 показаны схемы некоторых способов легирования металла при ЭШН.

Электрошлаковая наплавка при изготовлении или упрочнении торцевых объемов различных деталей штампов (формирующих и прошивных пуансонов, игл, выталкивателей и т. п.) предусматривает применение порошковой проволоки (рис. 18.8).

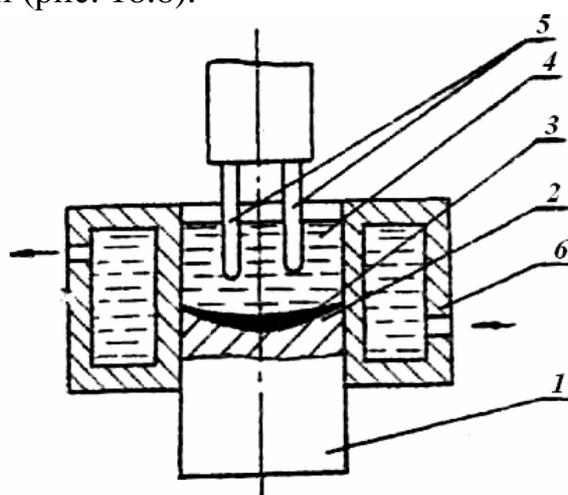


Рис. 18.8. Схема электрошлаковой наплавки порошковой проволокой:
 1 — наплавляемая деталь; 2 — покрытие; 3 — металлическая ванна,
 4 — шлаковая ванна; 5 — электрод; 6 — водоохлаждаемый кристаллизатор

Карбид вольфрама может использоваться для получения слоев на деталях, работающих в тяжелых условиях абразивного износа, при температурах 700... 900 °С, например, звездочки дробилок агломерата. Кроме релита применяют также дробленые пластины металлокерамических сплавов ТН-20. Наплавку производят проволочными электродами, материал которых образует матрицу композиционного сплава. Зерна твердой фазы подают при помощи дозатора в шлаковую ванну, а через нее – в жидкий металл (рис. 18.9).

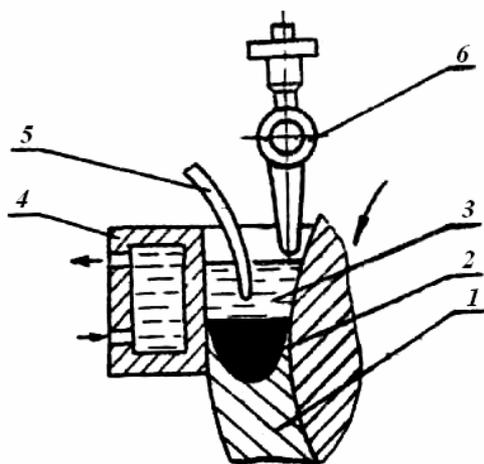


Рис. 18.9. Схема вертикальной электрошлаковой наплавки некомпактным материалом: 1 – наплавленный металл; 2 – металлическая ванна; 3 – шлаковая ванна; 4 – водоохлаждаемый кристаллизатор; 5 – электродная проволока; 6 – питатель-дозатор

Увеличить скорость процесса в 2... 2,5 раза и существенно улучшить структуру и механические свойства наплавленного металла, а также упростить дозировку некомпактного материала, обладающего ферромагнитными свойствами возможно путем подачи присадки на вылет электрода за пределами зазора (рис. 18.10).

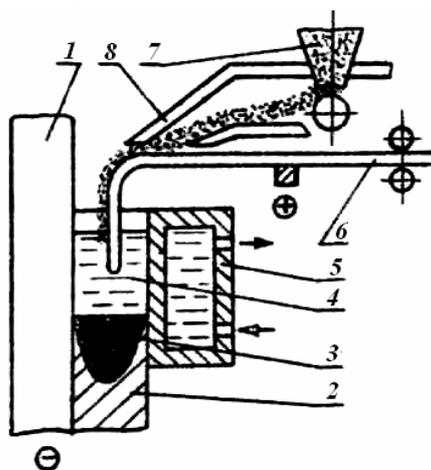


Рис. 18.10. Схема электрошлаковой наплавки ферромагнитным некомпактным материалом: 1 – наплавляемая деталь; 2 – покрытие; 3 – металлическая ванна; 4 – шлаковая ванна; 5 – водоохлаждаемый кристаллизатор; 6 – электродная проволока; 7 – дозирующее устройство; 8 – лоток

В качестве некомпактного материала используется крупка из проволоки 0,8... 1,6 мм, которая подается из специального дозирующего устройства на вылет проволочного электрода диаметром 5 мм, где она концентрируется в результате действия магнитного поля сварочного тока и совместно с электродом поступает в шлаковую ванну. Процесс может осуществляться на повышенном против обычной электрошлаковой наплавки, токе без нарушений формирования слоя и образования горячих трещин.

Получение композиционного износостойкого покрытия, состоящего из армирующих нерастворенных и недиссоциированных в слое зерен тугоплавких соединений предусматривает применение матричного металла с температурой плавления не более 1200 °С. Перспективными в этом отношении являются двойные системы: релит-марганцевый мельхиор, твердосплавные частицы – марганцевый мельхиор. Твердосплавные частицы ВК6 с использованием металла-связки МНМЦ20-20 при стыко-шлаковой наплавке удобнее вводить через электрод большого сечения (рис. 18.11).

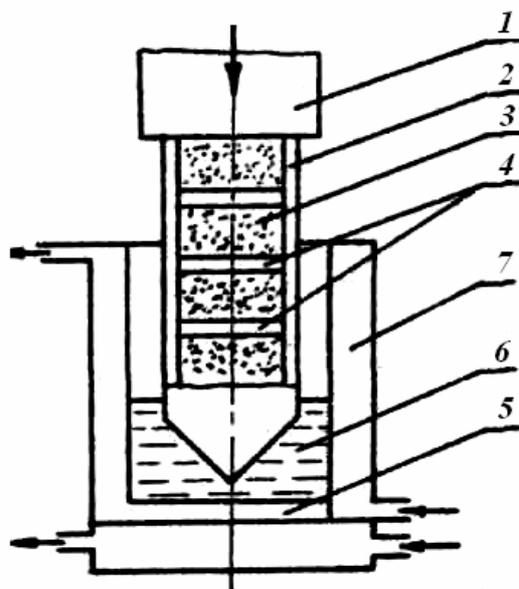


Рис. 18.11. Схема стыко-шлаковой наплавки композиционным сплавом:
 1 – наплавляемая деталь; 2 – труба-электрод; 3 – твердосплавные частицы;
 4 – шайба; 5 – наплавленный металл; 6 – шлаковая ванна;
 7 – водоохлаждаемый кристаллизатор

Легирование слоя наплавляемого на горизонтальные поверхности полуавтоматической электрошлаковой наплавкой пластинчатым электродом осуществляется нанесением тонкого слоя порошкообразной шахты на электрод, либо, в виде свободной насыпки, либо в виде обмазки (рис. 18.12).

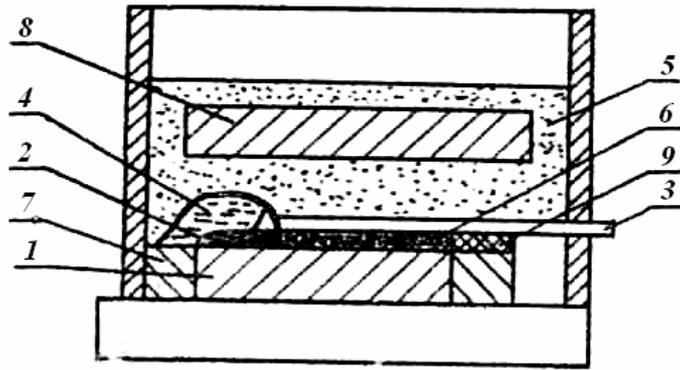


Рис. 18.12. Схема горизонтальной электрошлаковой наплавки лежачим электродом:

- 1 – наплавляемая деталь; 2 – ванна жидкого металла (покрытие);
 3 – плавящийся пластинчатый электрод; 4 – шлаковая ванна; 5 – флюс;
 6 – шихта; 7 – медный брусок; 8 – медная пластина; 9 – изолятор

В зависимости от состава легирующей шихты и соотношения между ее весом и весом металлического стержня можно получить покрытие с различными свойствами.

Широкослойная износостойкая многоэлектродная горизонтальная электрошлаковая наплавка позволяет оперативно в широких пределах изменять химический состав наплавленного металла (рис. 18.13).

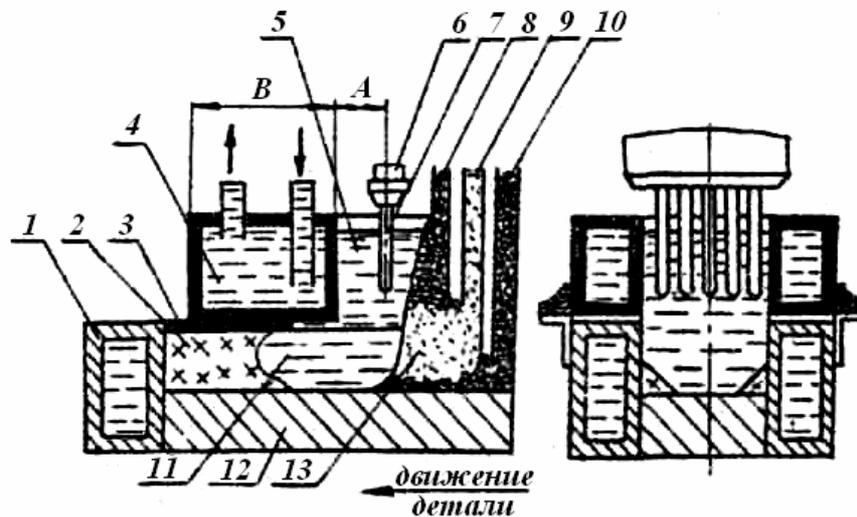


Рис. 18.13. Схема многоэлектродной горизонтальной

- электрошлаковой наплавки: 1 – формирующие медные пластины;
 2 – наплавленный металл; 3 – шлаковая корочка; 4 – охлаждающая коробка;
 5 – ванна жидкого шлака; 6 – многоэлектродный мундштук;
 7 – электродные проволоки; 8 – дозатор слоя флюса; 9 – дозатор слоя шихты;
 10 – дозатор подслоя флюса для выравнивания поверхности;
 11 – ванна жидкого металла; 12 – наплавляемая деталь; 13 – флюс;
 A и B – технологические расстояния

На практике часто возникает необходимость наплавки слоев небольшой толщины (3... 10 мм). Это возможно при использовании горизонтальной схемы электрошлаковой наплавки. Она обеспечивает получение биметаллического слоя или слоя переменного химического состава.

Использование некомпактных материалов позволяет значительно повысить производительность наплавочных работ и получить биметаллические детали, наплавленный слой которых имеет высокую износостойкость. С применением данной технологии возможна наплавка за один проход слоя практически любой заданной ширины.

На рис. 18.14 показана принципиальная схема установки для горизонтальной электрошлаковой наплавки по слою порошкового присадочного материала с использованием матричной ленты и неплавящегося электрода.

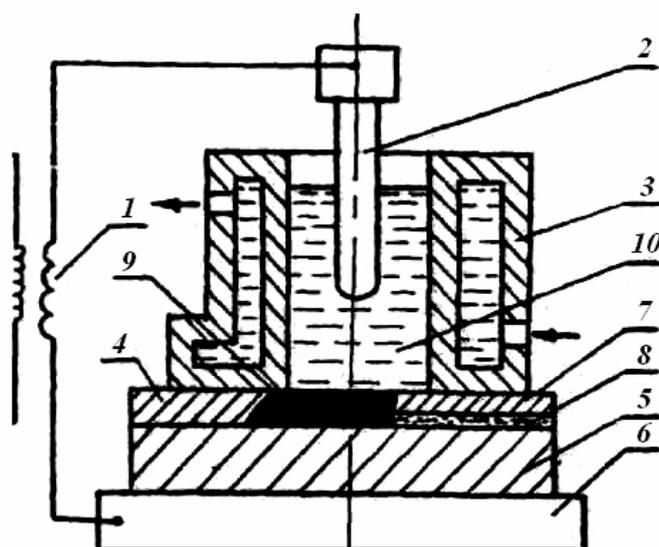


Рис.18.14 . Схема горизонтальной электрошлаковой наплавки по слою порошкового присадочного материала с использованием матричной ленты: 1 — источник питания; 2 — неплавящийся электрод; 3 — водоохлаждаемый кокиль-кристаллизатор; 4 — покрытие; 5 — наплавляемая деталь; 6 — силовой стол; 7 — матричная лента; 8 — порошковый присадочный материал; 9 — металлическая ванна; 10 — шлаковая ванна

Установка состоит из источника сварочного тока 1, графитового неплавящегося электрода 2, кокиля-кристаллизатора 3 и силового стола 6. Наплавляемая деталь 5 устанавливается на силовом столе 6 и имеет возможность горизонтального перемещения относительно кокиля-кристаллизатора 3 и неплавящегося электрода 2. Кокиль-кристаллизатор 3 движется по слою порошкового присадочного материала 8, прижатого матричной

лентой 7, при этом графитовым электродом 2 в кокиле-кристаллизаторе 3 наводится шлаковая 10 и металлическая 9 ванны. При горизонтальном движении силового стола 6 жидкий металл 9 попадает под нижний торец кокиля-кристаллизатора 3 и образует покрытие 4.

Данный способ обладает рядом преимуществ:

- возможность получения тонких покрытий толщиной 1... 3 мм;
- равномерность легирования покрытия;
- использование порошка любого гранулометрического состава с различным удельным весом;
- малая глубина проплавления основного металла;
- уменьшение тепловложения в основной металл, простота регулирования величины тепловложения.

18.4. Плазменная наплавка

В процессе плазменной наплавки между основным металлом детали и электродом горелки (катодом) возникает электрическая дуга, обеспечивающая переход в плазменное состояние рабочего газа, подаваемого в зону дуги. При этом из сопла горелки истекает высокотемпературная плазменная струя, обеспечивающая плавление наплавочного материала.

На (рис. 18.15) показана схема плазменной наплавки нагретой наплавочной проволокой.

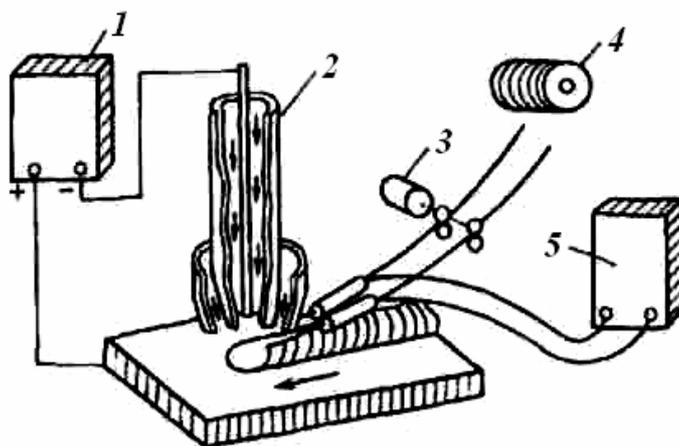


Рис. 18.15. Схема плазменной наплавки: 1 – источник питания постоянного тока; 2 – плазменная горелка; 3 – электродвигатель для подачи проволоки; 4 – наплавочная проволока; 5 – источник переменного тока для подогрева проволоки

Две проволоки, последовательно подключенные к источнику питания переменного тока, нагреваются за счет электросопротивления и подаются с постоянной скоростью в сварочную ванну под плазменной горелкой, где происходит их быстрое расплавление. Для образования плазмы используют смесь гелия (75 %) с аргоном (25 %), а в качестве защитного газа применяют аргон, защищающий сварочную ванну и кристаллизующийся наплавленный металл позади плазменной горелки от действия окружающего воздуха. При поперечных колебаниях плазменной горелки получают валик шириной до 64 мм.

Плазменную наплавку осуществляют расплавлением электродной или дополнительно введенной в плазменную струю проволоки. В качестве наплавочного материала используют порошок, который подают в плазму по каналу на выходе сопла горелки или наносят на поверхность изделия и расплавляют плазмой.

Преимуществами плазменной сварки и наплавки являются:

- высокая производительность;
- меньшая зона термического влияния;
- более низкая деформация обрабатываемых деталей.

Плазменную наплавку применяют для восстановления, упрочнения деталей нежесткой конструкции и нанесения покрытий из тугоплавких материалов.

18.5. Наплавка намораживанием из расплава

Сущность процесса заключается в том, что наплавляемый металл затвердевает на очищенной от оксидной пленки поверхности заготовки, погруженной в расплав этого металла. Из-за различия температур расплава T_1 и заготовки T_2 ($T_1 \gg T_2$) локальный объем расплава, контактирующий с поверхностью заготовки, охлаждается до затвердевания. После кратковременной выдержки в расплаве заготовку извлекают, и на ее поверхности получается слой присадочного металла.

Основные технологические операции процесса наплавки намораживанием:

- подготовка присадочного материала;
- подготовка наплавляемой поверхности заготовки;
- наплавка рабочей поверхности заготовки погружением в расплав металла (погружение, кратковременная выдержка, извлечение);
- охлаждение изделия.

Подготовка присадочного материала заключается в плавлении и достижении расплавом необходимой температуры, которая должна быть на

30... 50° выше температуры плавления присадочного материала. Плавление осуществляют в индукционной сталеплавильной тигельной печи.

Заготовку подготавливают к наплавке, удаляя с нее ржавчину и окалину. Затем изолируют ненаплавляемые участки, наносят флюс на подлежащую наплавке поверхность с последующей ее активацией.

Активацию наплавляемой поверхности осуществляют при ее нагреве в индукторе до 1123... 1173 К. При этой температуре флюс плавится, очищая заготовку от оксидов и защищая ее от окисления. Процесс активации протекает в течение 10... 12 с, и нагретая заготовка, например ковшовый зуб, подается на наплавку погружением в расплав (рис. 18.16).

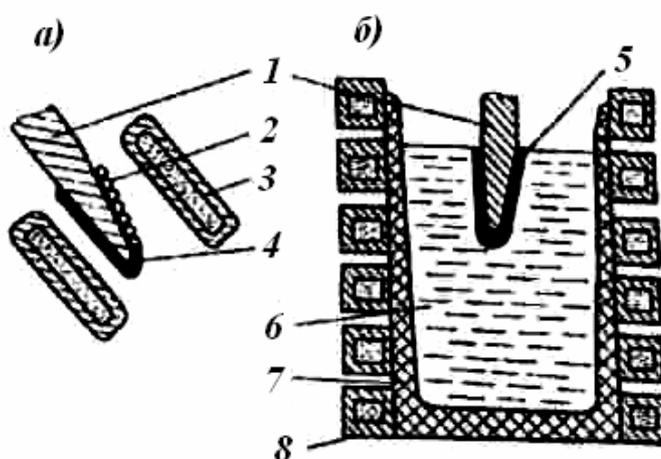


Рис. 18.16. Принципиальная схема активации (а) и наплавки намораживанием (б):

1 – деталь; 2 – флюс; 3 – индуктор; 4 – изоляционное покрытие;
5 – наплавленный сплав; 6 – расплав; 7 – тигель; 8 – индуктор плавильной печи

Наплавку проводят при выдержке ковшовых зубьев в расплаве в течение 0,8... 1,2 с. За это время на поверхности детали затвердевает слой присадочного сплава толщиной 2,5... 3,0 мм. Затем деталь охлаждают на воздухе.

Таким образом, *основными технологическими параметрами наплавки намораживанием являются:*

- температура активации и расплава,
- продолжительность контактирования заготовки с расплавом.

Регулируя указанные параметры, изменяют толщину наплавленного металла и повышают его качество.

Важным показателем качества наплавленного металла является его износостойкость, которая во многом зависит от химического состава при-

садового материала. Наплавку намораживанием проводят с помощью различных износостойких материалов.

Наращивают в основном наружные поверхности деталей. При этом конфигурация их может быть различной.

Анализ процесса наплавки намораживанием из расплава показывает, что *его преимуществами* являются *стабильность, производительность и качество наплавленного металла.*

Одной из проблем является *остающийся в тигле расплавленный присадочный металл.* Рассмотренный процесс наплавки широко внедряется в производство.

18.6. Индукционная наплавка порошковой шихтой

Технология индукционной наплавки основана на использовании токов высокой частоты (ТВЧ) для нагрева металла детали и за счет теплопередачи расплавления присадочного материала – специальной порошкообразной шихты. Она состоит из твердого сплава и флюса на основе буры, борного ангидрида и других веществ.

Шихту наносят на поверхность детали, которую можно предварительно обработать для получения геометрической формы и размеров в соответствии с существующими требованиями. Обработку выполняют лезвийным инструментом или путем пластического перераспределения металла. Толщина слоя шихты зависит от необходимой толщины наплавленного слоя. Деталь с нанесенной шихтой вводят в индуктор высокочастотной установки, как при индукционной закалке. Конструкция индуктора и расположение детали зависят от конфигурации наплаваемой поверхности.

При прохождении ТВЧ через контур индуктора в поверхностных слоях детали возникают токи, и наружный слой основного металла быстро нагревается. Шихта, расположенная между индуктором и нагреваемой поверхностью детали, вследствие высокого электросопротивления слабо реагирует на воздействие переменного электромагнитного поля. Она нагревается, главным образом, за счет теплопередачи от основного металла. При температуре 950... 970 К флюс шихты плавится, затем он вступает во взаимодействие с оксидами и разрушает окисные пленки на поверхности основного металла и порошкообразных частиц твердого сплава. Флюс выполняет также защитные функции, предотвращая образование окислов, и сдерживает теплоотдачу в окружающую среду.

Дальнейшее повышение температуры шихты вызывает плавление ее металлической части. При этом жидкий сплав вытесняет отработавший флюс с наплавляемой поверхности. Флюс всплывает, так как его удельный вес меньше, чем сплава. Это способствует активизации сил межмолекулярного взаимодействия на границе жидкий металл – наплавляемая поверхность. Отсутствие окисных пленок снижает вязкость жидкого сплава, что также облегчает процессы вытеснения и всплытия отработавшего флюса.

После всплытия флюса и появления блестящей стекловидной массы индукционный нагрев детали прекращают. В течение 5... 8 с наплавленный сплав остывает и переходит в твердое состояние. Наплавленная деталь охлаждается до комнатной температуры на воздухе или в песке.

Следует отметить, что высокие температуры и различный химический состав флюса, твердого сплава и основного металла создают благоприятные условия для развития диффузии, которая способствует прочному сцеплению наплавленного слоя с деталью.

Таким образом, процессы, протекающие при индукционной наплавке порошковой шихтой, можно разделить на следующие этапы (рис. 18.17):

- нагрев основного металла 3 и теплопередача в шихту до температуры ее плавления, окисление поверхности основного металла и порошкообразных частиц сплава 2 (а);
- расплавление флюса 1 (б);
- взаимодействие флюса с окисными пленками на поверхности основного металла и порошкообразных частиц твердого сплава с разрушением окислов, развитие диффузии (в);
- нагрев и расплавление твердосплавной части шихты, всплытие отработавшего флюса (г);
- формирование наплавленного слоя в период кристаллизации;
- охлаждение до $T = 990$ К, сопровождаемое диффузионными процессами (д);
- охлаждение до комнатной температуры, когда диффузионные процессы практически не протекают (е).

Преимуществами процесса индукционной наплавки являются:

- повышенная износостойкость наплавленного слоя;
- несложное оборудование и оснастка;
- возможность автоматизации процесса;
- чистота рабочего места.

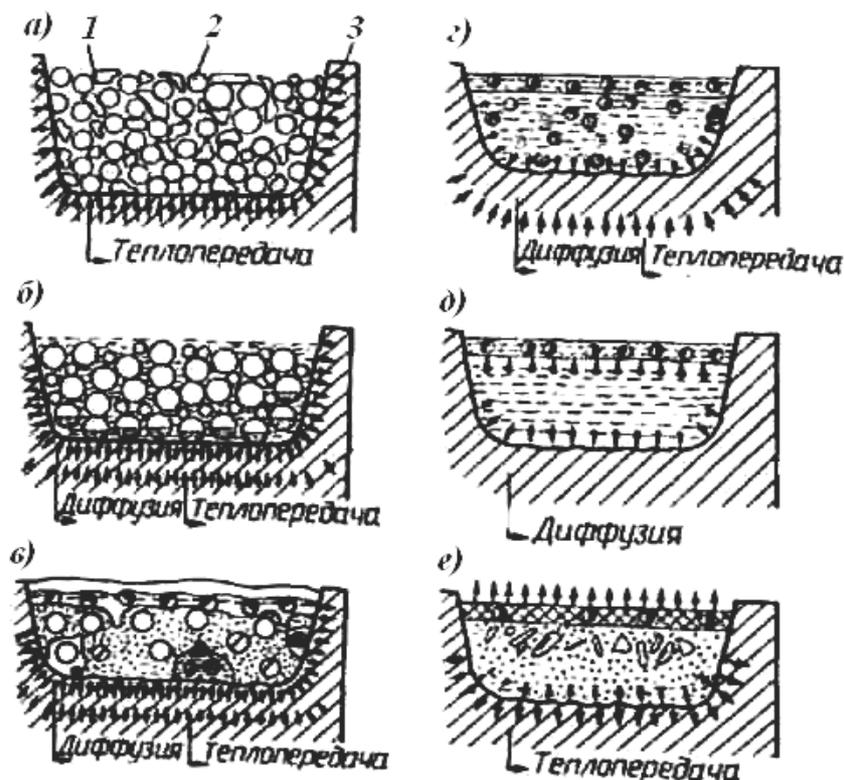


Рис. 18.17. Схема процессов при индукционной наплавке порошковой шихтой: 1 – флюс; 2 – сплав; 3 – деталь; а) – окисление поверхности основного металла; б) – расплавление флюса; в) – развитие диффузии; г) – всплытие отработавшего флюса; д) – охлаждение до $T = 990 \text{ K}$; е) – охлаждение до комнатной температуры

Однако нельзя наплавлять наружные цилиндрические поверхности деталей из-за местного перегрева и ухудшения физико-механических свойств основного металла.

Указанные преимущества и недостатки учитывают при изучении возможностей рассматриваемой технологии для восстановления и упрочнения новых деталей: лемехов плугов общего назначения и предплужников, полольных лап культиваторов, сошников кукурузных сеялок; стрелочных лап культиваторов, лемехов выкопчного лесного плуга; ножей измельчающего аппарата силосоуборочного комбайна, лопаток мельничных вентиляторов, дисковых рабочих органов, лемехов глубокорыхлителей, которые имеют значительную восстанавливаемую поверхность (детали последовательно перемещаются в индукторе, а шихту из дозатора наносят перед наплавкой участка детали); трубы пульповодов, втулок, гильз цилиндров двигателей, внутренние поверхности которых восстанавливают и упрочняют индукционной центробежной наплавкой (трубы нагревают кольцевым индуктором, а втулки и гильзы цилиндров – внутренним, шихту подают специальным дозатором).

18.7. Способы газопламенной наплавки

18.7.1. Наплавка проволокой или прутком

При ручной газовой наплавке присадочный металл расплавляют пламенем, защищают его от кислорода и азота воздуха также пламенем, которое получают при сжигании горючих газов в технически чистом кислороде. В качестве горючего, позволяющего достичь максимальной температуры пламени (порядка 3300 К), чаще применяют баллонный или генераторный ацетилен.

В зависимости от соотношения расхода кислорода и ацетилена ($\alpha = \frac{O_2}{C_2H_2}$) различают три вида пламени: нейтральное (нормальное, при котором $\alpha = 1 \dots 1,25$; восстановительное (науглероживающее, $\alpha < 1$); окислительное ($\alpha > 1,25$).

Обычную сварку и наплавку деталей из сталей, чугуна и цветных металлов выполняют *нейтральным пламенем*.

Восстановительное пламя используют при сварке и наплавке деталей из высокоуглеродистых и легированных сталей и при наплавке изношенных поверхностей твердыми сплавами. При уменьшении α до 0,76... 0,83 и применении присадочного материала, легированного марганцем и кремнием, производительность ацетиленокислородной сварки можно повысить на 15... 20 %. Одной из причин этого является окисление кислородом горелки марганца и кремния с выделением дополнительного тепла.

Окислительное пламя применяют при резке металла. Небольшой избыток кислорода в пламени целесообразен только при сварке латуни.

Оптимизация режима включает выбор способа наплавки, мощности и состава пламени, угла наклона горелки, диаметра присадочного прутка и порядка наложения валика.

Различают левый и правый способы сварки и наплавки (рис. 18.18).

При левом способе пламя направляют на поверхность основного металла, а присадочный пруток перемещают перед пламенем. При этом для более полного и равномерного прогрева и перемешивания сварочной ванны горелку и пруток перемещают зигзагообразно. Левый способ целесообразно применять для наплавки деталей толщиной до 4... 5 мм, а также металлов с пониженной (по сравнению со сталью) температурой плавления. Кроме того, при этом способе наплавки лучше формируется шов.

При правом способе наплавки пламя направляют на уже наплавленную часть металла, а пруток перемещается вслед за ним по спирали. Горелку при этом перемещают прямолинейно. Поперечные колебания горелки применяют лишь при наплавке изделий большой толщины.

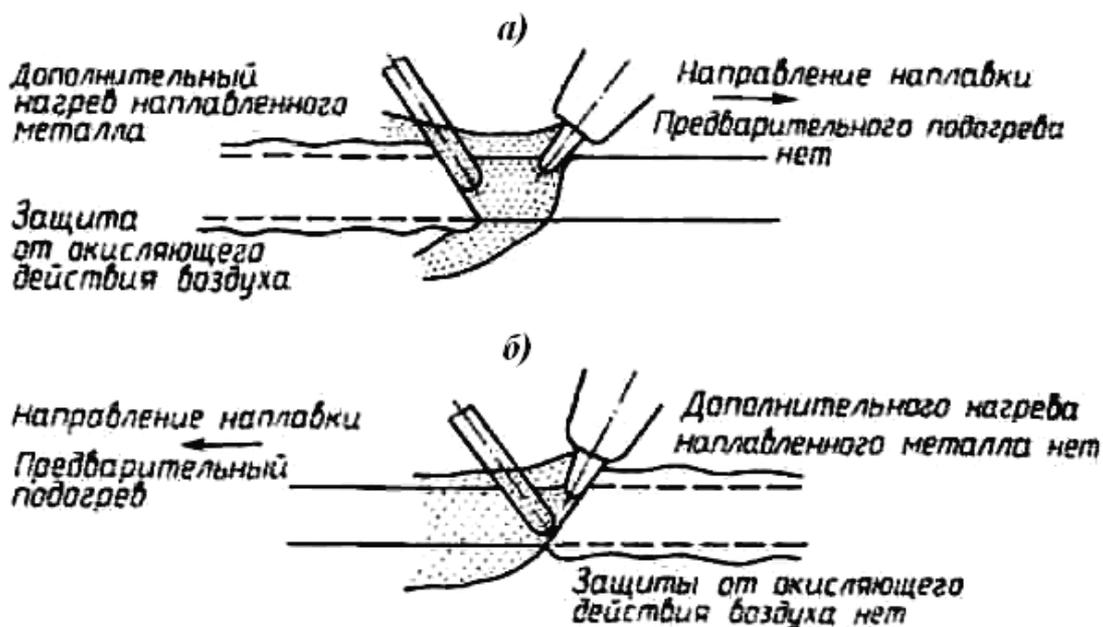


Рис. 18.18. Способы сварки и наплавки:
а – правый; *б* – левый

Правый способ наплавки повышает производительность процесса и одновременно снижает удельный расход газов за счет лучшего использования теплоты, а также уменьшает коробление металла за счет большей сосредоточенности нагрева.

Качество и производительность процесса наплавки в значительной степени зависят от мощности пламени (часового расхода горючего газа),

Увеличение мощности пламени способствует повышению скорости наплавки, однако возрастает опасность пережога металла и расширения зоны термического влияния. Поэтому мощность пламени можно увеличивать до определенных пределов.

Состав пламени устанавливают по внешнему виду. При окислительном пламени его размеры сокращаются, и оно приобретает фиолетовую окраску. При восстановительном пламени конус ядра удлиняется, его граница несколько размывается, образуется пелена оранжевого цвета в средней зоне. При избытке горючего пламя удлиняется и становится красноватым.

Угол наклона мундштука горелки к поверхности металла зависит от толщины наплавляемой детали. Чем толще металл, тем больше угол. Больше угол и в начале процесса наплавки, когда изделие «холодное», затем он уменьшается до 30... 40°. К концу наплавки, когда кромки изделия сильно прогреты, во избежание пережога металла угол должен быть еще меньше. Присадочную проволоку располагают под углом 45° к поверхности металла в сторону, противоположную наклону мундштука горелки.

Диаметр присадочного прутка (проволоки) определяют по формулам:
для левого способа:

$$d = \frac{\delta}{2} + 1, \quad (18.1)$$

для правого способа:

$$d = \frac{\delta}{2}, \quad (18.2)$$

где d – диаметр прутка (проволоки), мм;
 δ – толщина наплавляемой детали, мм.

Газопламенная технология характеризуется следующими преимуществами.

- Незначительное проплавление основного металла.
- Возможность наплавки мелких деталей сложной формы.
- Снижение опасности возникновения трещин, поскольку процесс наплавки включает предварительный подогрев и последующее замедленное охлаждение изделия.
- Низкая стоимость, компактность оборудования для наплавки и напыления.
- Надежность работы и возможность эксплуатации оборудования в местах, удаленных от источников электрической энергии, незначительный шум от работ установок.

Недостатки газопламенной технологии наплавки и напыления.

- Низкая производительность при наплавке массивных деталей, требующих продолжительного предварительного подогрева.
- Высокая квалификация сварщика.
- Расходуются дефицитные газы.

18.7.2. Газопорошковая наплавка

Процесс газопорошковой наплавки состоит в напылении порошкового сплава специальной газопламенной горелкой на предварительно подогретую поверхность изделия, оплавлении нанесенного покрытия, последующем напылении с оплавлением до получения требуемой толщины наплавки.

Свойства металла наплавки и его соединения с основным металлом во многом зависят от глубины проплавления основного металла, перемешивания его с наплавляемым и перехода элементов основного металла в наплавленный слой. При этом, как правило, чем больше глубина проплавления, степень перемешивания и переход элементов основного металла в наплавленный слой, тем хуже свойства нанесенного слоя и соединения в целом.

Газопорошковая наплавка позволяет упрочнять детали сложной конфигурации слоем минимальной толщины (0,1 мм и выше) без разбавления основным металлом, так как переходная зона при этом составляет всего 100... 120 мкм. Кроме того, при газопорошковой наплавке обеспечиваются благоприятные условия для предотвращения окисления и испарения компонентов наплавляемого металла.

Процесс газопорошковой наплавки осуществляется при помощи специальных горелок (рис. 18.19), для работы которых чаще используют ацетилено-кислородное пламя. Состав пламени определяют на основании законов химического равновесия. Установлено, что только нормальное пламя ($\alpha = 1,2$) обладает необходимыми для рассматриваемого процесса свойствами.

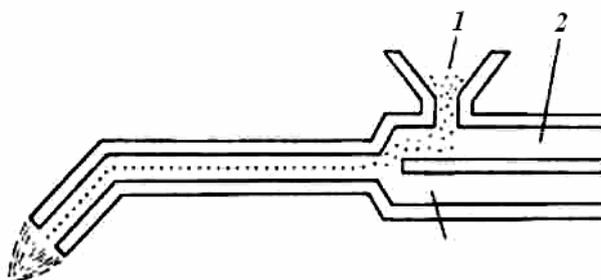


Рис. 18.19. Схема горелки для газопорошковой наплавки:
 1 – бункер с порошком наплавляемого материала; 2 – канал для подачи кислорода;
 3 – канал для подачи горючего газа

Газопорошковая наплавка позволяет получать покрытия, свободные от пор, без шлаковых включений, при отсутствии перемешивания с материалом изделия. Структура наплавленного покрытия состоит из твердого раствора, сложной эвтектики и первичных кристаллов. Среди первичных кристаллов различают несколько видов: шестигранные кристаллы (карбидов хрома), *H*-образные (боридов хрома), компактные и избыточные. Протяженность зоны сплавления с материалом изделия не превышает 0,04 мм. Твердость наплавленного покрытия в зависимости от марки порошка составляет 35... 62 HRC.

Результаты исследования показали, что при оптимизации процесса газопорошковой наплавки можно получать покрытия с необходимым комплексом свойств при толщине слоя всего 0,1... 0,3 мм. При этом коэффициент использования порошка достигает 80 %.

Газопорошковую наплавку целесообразно выполнять в следующей последовательности:

- деталь устанавливают в приспособление, обеспечивающее расположение наплавляемой поверхности в горизонтальной плоскости $\pm 15^\circ$;
- поверхность детали нагревают пламенем горелки до 573... 623 К;
- включают подачу порошка и наносят на подогретую поверхность детали покрытие толщиной 0,1 мм;

- выключают подачу порошка и, нагревая деталь пламенем горелки, оплавливают напыленный слой;
- чередуя напыление и оплавление покрытия, наносят требуемую толщину слоя, которую контролируют штангенциркулем или шаблоном.

Контрольные вопросы

1. В чем заключаются сущность и особенности наплавки металлов?
2. Приведите схемы электродуговой наплавки покрытыми электродами и охарактеризуйте их.
3. Каковы особенности электродуговой наплавки под слоем флюса?
4. Как осуществляется процесс многоэлектродной наплавки под слоем флюса? Приведите схему наплавки.
5. Какие преимущества и недостатки наплавки под слоем флюса?
6. В чем сущность наплавки открытой дугой? Каковы ее преимущества при использовании порошковой проволоки?
7. Как осуществляется наплавка в среде углекислого газа? Какие существуют варианты наплавки?
8. Какие основные технологические параметры наплавки в среде углекислого газа? Преимущества и недостатки способа наплавки.
9. В чем заключается наплавка в среде инертного газа?
10. Что представляет собой вибродуговая наплавка? Приведите принципиальную схему вибродуговой наплавки.
11. Каковы преимущества и недостатки вибродуговой наплавки?
12. В чем сущность электрошлаковой наплавки? Как классифицируются способы электрошлаковой наплавки?
13. Приведите основные схемы электрошлаковой наплавки и охарактеризуйте их.
14. Как осуществляется процесс наплавки плазмой? Приведите схему плазменной наплавки.
15. Что представляет собой наплавка намораживанием из расплава? Какие основные технологические операции процесса?
16. В чем заключаются сущность индукционной наплавки порошковой шихтой? Какие можно выделить этапы наплавки? Преимущества способа.
17. В чем сущность способа газопламенной наплавки проволокой или прутком? Чем отличаются левый и правый способы наплавки?
18. Какие преимущества и недостатки газопламенной технологии наплавки?
19. Охарактеризуйте способ газопорошковой наплавки. В какой последовательности выполняют газопорошковую наплавку?

19. ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЕ И ГАЗОПЛАМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ

Напыление – образование на поверхности изделия покрытия из нагретых до плавления, или близких к плавлению, частиц распыляемого материала в результате использования теплоты сжигания горючей смеси или теплоты дугового разряда в газовых средах.

Применяется для повышения износостойкости, коррозионной стойкости и других эксплуатационных характеристик изделий путем термообработки, легирования, наплавки и оплавления лазерным лучом напыленных покрытий.

Напыление принципиально отличается от процесса наплавки покрытий отсутствием оплавления поверхности основного материала детали.

Широко применяется старая технология напыления с использованием электрической энергии – *дуговая металлизация*. Часто используется *плазменное напыление*. *Электроимпульсный способ* дал хорошие результаты при нанесении покрытий на внутренние цилиндрические поверхности деталей машин.

Нашли свое применение в промышленности различные *способы газопламенного напыления*.

Благодаря напылению появились новые технологии поверхностной обработки, которые можно применять в различных областях народного хозяйства.

19.1. Способы электротермического напыления

Электротермические способы напыления подразделяются на дуговой, плазменный, электроимпульсный и высокочастотный индукционный. Последний способ разработан и впервые применен в бывшем СССР.

19.1.1. Дуговая металлизация

Принципиальная схема процесса дуговой металлизации показана на рис. 19.1.

Через два канала в горелке непрерывно подают две проволоки диаметром 1,5... 7,0 мм, между концами которых возбуждается дуга и происходит расплавление проволоки. Расплавленный металл подхватывается струей сжатого воздуха, истекающего из центрального сопла электрометаллизатора, и в виде мельчайших частиц переносится на поверхность основного материала.

Распыление и транспортирование расплавленного металла обычно осуществляется сжатым воздухом, хотя при напылении коррозионно-стойкую сталью и алюминиевыми сплавами используют азот. При дуговом

напылении на постоянном токе процесс протекает стабильно, полученный слой покрытия имеет мелкозернистую структуру при высокой производительности процесса. Поэтому для дугового напыления используют источники постоянного электрического тока со стабилизатором напряжения или с незначительно возрастающей вольтамперной характеристикой.

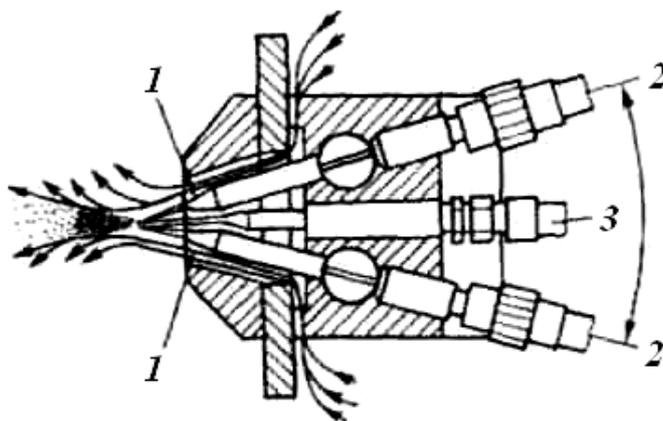


Рис. 19.1. Схема дугового напыления:

1 – насадок; 2 – место ведения напыляемого материала (проволоки);
3 – место подачи сжатого воздуха

Температура дуги зависит от вида транспортирующего газа, состава электродной проволоки, режимов напыления и других параметров. При использовании металлических электродов и силе тока дуги 280 А достигается температура около 6100 ± 200 К. В процессе дуговой металлизации, протекающем при такой температуре, облегчается образование капель напыляемого материала.

Основными технологическими параметрами рассматриваемого способа напыления являются:

- состав электродной проволоки;
- мощность дуги;
- расход распыляющего газа;
- диаметр электродной проволоки;
- скорость подачи проволоки;
- угол встречи потока частиц с поверхностью напыления;
- дистанция напыления;
- скорость перемещения пятна напыления.

С увеличением удельной мощности дуги возрастают потери перегретого металла на испарение, может наблюдаться его разбрызгивание при формировании покрытия. Однако повышение температуры частиц положительно влияет на качество покрытий. Экспериментально установлено, что при дуговом напылении алюминием увеличение удельной мощности

от 3000 до 8500 кДж/кг (скорость подачи проволоки постоянна) вызывает повышение температуры напыляемых частиц от 1173 до 2173 К. Мощность дуги определяется величиной тока и напряжения. Последний параметр обычно является нерегулируемым. Необходимую мощность устанавливают путем изменения тока дуги. В практике дуговой металлизации используют мощность 5... 20 кВт, силу тока 80... 600 А и напряжение 18... 35 В.

Увеличение давления и расхода газа приводит к повышению скорости струи и ее распыляющей способности. Необходимо стремиться к сверхзвуковому характеру истечения газа с минимальным перепадом давлений на срезе сопла. При этом облегчается перенос расплавленного металла с поверхности плавления проволоки, его диспергирование и возрастание скорости частиц. На практике давление распыляющего газа выбирают равным 0,35... 0,55 МПа, расход его составляет 60... 150 м³/ч.

С увеличением диаметра проволоки усиливается турбулизация распыляющей струи. Малые диаметры проволоки усложняют процесс, так как требуется высокая скорость подачи и наблюдается интенсивное блуждание плавящихся торцов проволоки.

Для заданного режима работы распылителя выбирают максимальную скорость подачи проволоки. Благодаря этому достигаются минимальные значения удельной мощности дуги. В практике дуговой металлизации скорость подачи проволоки составляет 0,05... 0,35 м/с, производительность распыления – 2... 50 кг/ч.

Угол, который составляет поток движущихся частиц с поверхностью напыления, равняется 65... 90°. Минимальный угол соответствует 45°. Дистанция напыления составляет 60... 150 мм, скорость перемещения пятна напыления 0,5... 0,8 м/с.

По сравнению с газопламенным напылением при использовании электрометаллизации можно получать более прочные покрытия, которые лучше соединяются с основой. Применяя в качестве электродов проволоку из двух различных металлов, можно получить покрытие из их сплава. Такие сплавы называют псевдосплавами. Эксплуатационные расходы при электрометаллизации небольшие. При напылении покрытия распылением двух электродов из разнородных материалов желательно применять такие электрометаллизаторы, которые позволяют регулировать скорость подачи каждого электрода.

Способ дуговой металлизации получил широкое распространение. Однако в этой технологии заложена опасность перегрева и окисления напыляемого материала при низких скоростях подачи распыляемой проволоки. Кроме того, большое количество теплоты, выделяющейся при горении

дуги, приводит к значительному выгоранию легирующих элементов, входящих в напыляемый сплав (например, содержание углерода в материале покрытия снижается на 40... 60 %, а кремния и марганца – на 10... 15 %).

Для совершенствования процесса дугового напыления необходимо улучшить имеющиеся аппараты и создать принципиально новые. Например, созданы металлзаторы, предусматривающие распыление проволоки не сжатым газом, а электромагнитным полем. Необходимы новые проволочные материалы, в том числе композиционные, к которым относится порошковая проволока. Она состоит из металлической оболочки (например, кобальтовая или никелевая лента) и порошкового сердечника (например, карбид вольфрама или хрома). Перспективным является нанесение износостойких покрытий с применением композиционных волокнистых проволок из никеля и алюминия.

19.1.2. Плазменное напыление

Плазменная струя, применяемая для напыления, представляет собой направленный поток частично или полностью ионизированного газа, имеющего температуру 10 000... 20 000 °С. Плазму получают в плазменных горелках, пропуская газ через столб сжатой дуги. Дуга горит в узком канале сопла горелки, через который продувают газ. При этом столб дуги сжимается, что приводит к повышению в нем плотности энергии и температуры. Газ, проходящий через столб дуги, нагревается, ионизируется и выходит из сопла в виде высокотемпературной плазменной струи. В качестве плазмообразующих газов применяют азот, аргон, водород, гелий, воздух и их смеси. Газ выбирают в зависимости от процесса обработки и вида обрабатываемого материала.

Газотермическое плазменное напыление, в зависимости от вида напыляемого материала (порошок или проволока) может проводиться плазменной струей или плазменной дугой (рис. 19.2).

В первом случае в зону плазменной струи под давлением транспортирующего газа подают материал в виде порошка, *во втором* – используют проволочный материал.

Соответственно применяют две схемы плазменных горелок. В горелках для получения плазменной струи дуга горит между вольфрамовым электродом 2 и соплом 4, к которому подключен положительный полюс источника тока (рис. 19.2, а).

Электрод изолирован от корпуса горелки керамической прокладкой 3. Сопло интенсивно охлаждается водой. Из сопла выходит ярко светящаяся плазменная струя 5. Горелка питается постоянным током прямой полярности от источников с падающей характеристикой. Дугу зажигают с помощью осциллятора.

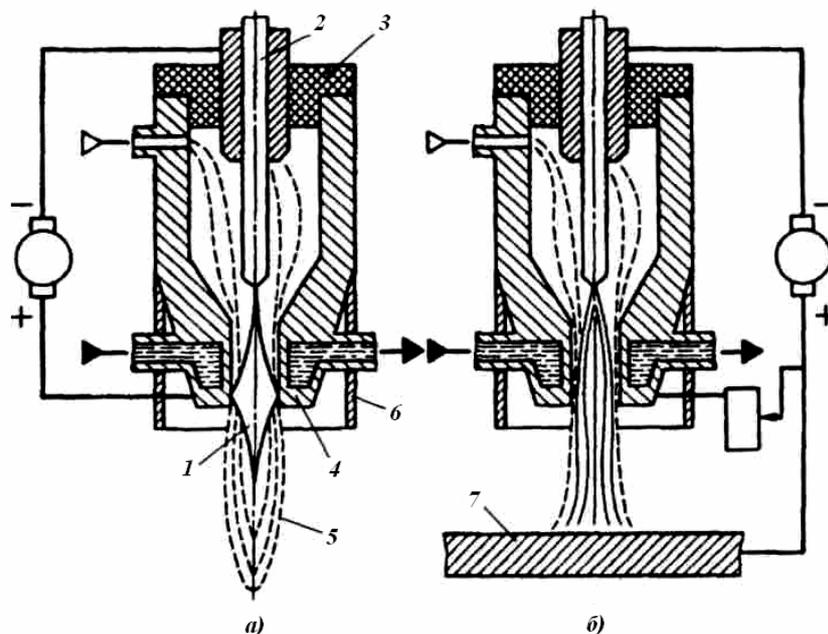


Рис. 19.2. Схемы процесса получения плазменных источников нагрева:
 а – плазменной струи, выделенной из дуги;
 б – плазменной дуги, совмещенной с плазменной струей

Плазменная струя представляет собой независимый источник теплоты, позволяющий в широких пределах изменять степень нагрева и глубину проплавления поверхности заготовок. Тепловая мощность плазменной струи ограничена. Она применяется для сварки и резки тонких металлических листов и неэлектропроводящих материалов, а также для напыления тугоплавких материалов на поверхность заготовок. Горелки, предназначенные для сварки, снабжены вторым concentрическим соплом б, через которое подается защитный газ.

Устройство горелок для получения плазменной дуги (рис. 19.2, б) принципиально не отличается от устройства горелок первого типа. Только дуга горит между электродом и заготовкой 7. Для облегчения зажигания дуги вначале возбуждается маломощная вспомогательная дуга между электродом и соплом. Для этого к соплу подключен токопровод от положительного полюса источника тока. Как только возникшая плазменная струя коснется заготовки, зажигается основная дуга, а вспомогательная выключается.

Основными технологическими параметрами рассматриваемого способа напыления являются:

- состав порошкового материала;
- мощность дуги;
- расход плазмообразующего газа;

- расход газа на подачу порошка;
- скорость подачи порошка;
- размер его частиц;
- угол встречи потока частиц с поверхностью напыления;
- дистанция напыления;
- скорость перемещения пятна напыления.

С увеличением мощности дуги интенсивно возрастают температура и энтальпия плазменной струи как на срезе сопла, так и в других ее сечениях. Мощность дуги определяется напряжением и силой тока. Напряжение зависит от длины дуги, что в свою очередь определяется конструкцией распылителя, видом и расходом плазмообразующего газа. При реализации заданной мощности дуги необходимо выбирать режим работы с максимальным напряжением.

При плазменном напылении объемный расход плазмообразующего газа составляет 2,0... 4,0 м³/ч, массовый – 1,8... 7,2 кг/ч.

Расход газа на подачу порошка составляет около 10 % расхода плазмообразующего газа.

Скорость подачи порошка обычно оценивают по его расходу, она составляет 0,9... 7,2 кг/ч.

Для плазменного напыления применяют порошок со средним диаметром частиц 10... 200 мкм.

Дистанцию напыления принимают равной 50... 300 мм.

Основным компонентом оборудования и технологии плазменно-дугового напыления покрытий являются плазмотроны. Плазмотроны, применяемые в СНГ и за рубежом, отличаются системой охлаждения электродов и местом введения порошка в плазменную струю (рис. 19.3).

Главная часть плазмотрона – сопловой (анодный) узел, включающий системы охлаждения и введения порошка в плазменную струю. Через электроизоляционный блок сопловой узел стыкуется с катодным, который представляет собой стержневой электрод, изготовленный из вольфрама с добавками, и систему его охлаждения. Плазмотрон может быть выполнен в виде пистолета (рис. 19.3, а) или с насадкой в виде пистолета с удлиненным стволом (рис. 19.3, в). Выбор конструкции плазмотрона определяется конфигурацией детали и формой поверхности, на которую наносят покрытие.

Наибольшему износу подвергается сопло плазмотрона, поэтому его делают сменным. Срок службы сопла зависит от режима эксплуатации плазмотрона, вида рабочего газа, системы охлаждения и составляет 15... 100 ч.

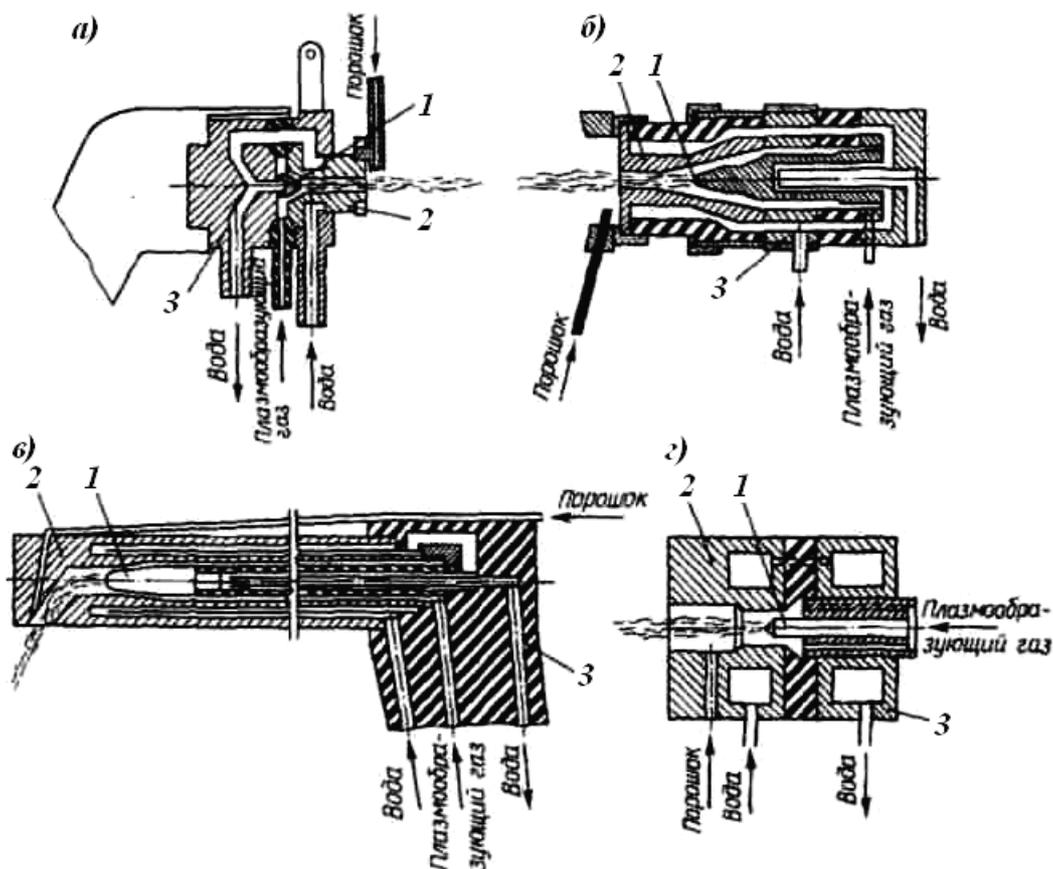


Рис. 19.3. Схемы плазмотронов: а – фирмы «Метсо»; б – фирмы «Plasma-Technik»; в – «Plasma-dain»; г – конструкция НИИАвтогенмаш (1 – катод из вольфрама; 2 – медное сопло (анод); 3 – корпус плазмотрона)

Рассмотренный способ плазменного напыления обладает важными преимуществами:

- получение покрытий из материалов, плавящихся без разложения, без ограничения по температуре плавления;
- использование для образования струи дуговой плазмы различных газов: инертных (аргона, гелия), восстановительных (водорода) и окислительных (воздуха, азота), а также аммиака, природного газа, водяного пара, что в сочетании с применением камер с защитной средой (вакуумом) или защитных насадок позволяет регулировать свойства среды, в которой нагреваются и движутся частицы порошка;
- гибкое регулирование электрического и газового режимов работы плазмотрона, в том числе в процессе нанесения покрытия, что позволяет управлять энергетическими характеристиками напыляемых частиц и условиями формирования покрытия;

- достаточно высокие производительность процесса и коэффициент использования напыляемого материала;
- нагрев поверхности до сравнительно небольших температур, что позволяет сохранить особенности структуры и свойства материала основы.

Недостатками плазменно-дугового способа нанесения покрытий в открытой атмосфере являются:

1. низкая прочность сцепления покрытий с деталью для ряда условий эксплуатации (10... 50 МПа при испытаниях на нормальный отрыв);
2. высокий уровень шума (110... 130 дБ) и излучения;
3. относительно высокая стоимость оборудования и его стационарность.

Благодаря преимуществам плазменное напыление является одной из самых распространенных электротермических технологий нанесения защитных покрытий. Номенклатура напыляемых изделий и количество проектируемых технологических процессов постоянно возрастают.

19.1.3. Подводное плазменное напыление покрытий

Процессы подводного плазменного напыления и обработки материалов отличаются от широко применяемых способов газотермической обработки тем, что генерируемая в электродуговом плазмотроне высокотемпературная газовая струя истекает не в атмосферу газов, а в воду. Последняя заполняет все рабочее пространство между соплом плазмотрона и обрабатываемой поверхностью изделия, образуя своеобразную окружающую среду. Различия заключаются в том, что вода имеет значительно более высокие плотность, вязкость, теплопроводность и теплоемкость по сравнению с газовыми средами, является практически несжимаемой. С одной стороны, это повышает концентрацию энергии плазмы вследствие уменьшения размеров струи, с другой – приводит к захлаживанию струи и обеспечивает экстремально высокие скорости охлаждения основы и напыленного материала. Понимание роли воды как значимого технологического фактора позволяет рассматривать «подводные» технологии не только как способ нанесения покрытий на морскую технику или ремонта ядерных реакторов «in-situ», но и как эффективный инструмент создания новых материалов.

Изоляция плазменной струи и зоны обработки под водой является фактором, заслуживающим специального рассмотрения. Здесь актуальны два аспекта.

Первый связан с резким снижением пылевыведения, шума и излучения в воде, которая исполняет роль эффективного фильтра. Это приводит к значительному улучшению условий труда, позволяет организовать процессы обработки высокотоксичных материалов.

Другой аспект касается защиты зоны обработки от воздуха. Фактически химический состав струи определяется только составом плазмообразующих газов и специально инжестируемых в них материалов. Этот фактор способствует заметному снижению скорости окисления материалов во время напыления, а также означает возможность организации плазмохимического синтеза новых материалов путем управления составом струи.

Основные технологические параметры, оказывающие влияние на качество покрытий, при подводном плазменном напылении и традиционном процессе аналогичны. Однако специфика окружающей среды обуславливает различие значений параметров сопоставляемых процессов. Для обработки технологии подводного плазменного напыления проведены исследования в Институте материаловедения Аахенского технического университета (ФРГ), фирме «Plasma-Technik» (Швейцария), Государственном научно-производственном концерне порошковой металлургии (Беларусь).

Как было отмечено выше, особенности подводного плазменного напыления обеспечивают ряд преимуществ процесса. Недостатками рассмотренной технологии являются нестабильное горение дуги плазмотрона при повышенном давлении воды и незначительная площадь покрытия за один проход плазмотрона.

19.1.4. Электроимпульсное нанесение покрытий

Используемая для электроимпульсного нанесения покрытий электрозарядная цепь представляет собой колебательный контур и характеризуется следующими данными: емкость конденсатора 100 мкФ, максимальное напряжение зарядного тока 30 кВ, собственная частота колебаний электро-разрядной цепи 25 кГц (рис. 19.4).

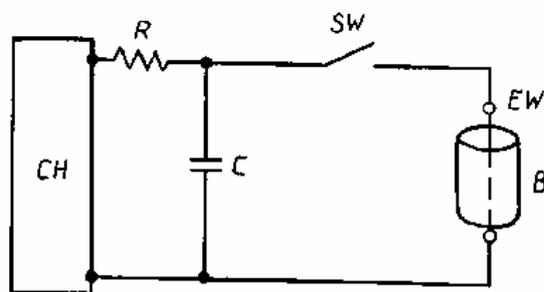


Рис. 19.4. Схема электроимпульсного напыления:

CH – источник питания для зарядки конденсатора; *R* – резистор;
C – конденсатор; *SW* – выключатель; *EW* – металлическая проволока;
B – основной материал (цилиндрическое изделие)

Для напыления используют металлическую, например вольфрамовую, проволоку диаметром 0,5... 1 мм и длиной 20... 150 мм. Режим напыления, который выбирают в зависимости от размера и формы изделия, согласно экспериментальным данным, определяют по уравнениям:

$$S = K_1 C U f_k^{\frac{2}{3}}, \quad (19.1)$$

$$L = K_2 U f_k^{\frac{2}{3}}, \quad (19.2)$$

где S – площадь сечения металлической проволоки, мм²;

L – ее длина, мм;

C – емкость конденсатора, Ф;

U – напряжение зарядного тока, В;

f_k – собственная частота колебаний электроразрядной цепи, Гц;

K_1 и K_2 – постоянные, определяемые материалом проволоки ($K_1 = (1... 3) \cdot 10^{-3}$, $K_2 = 4$).

Расстояние l от поверхности изделия до расплавляемого конца металлической проволоки определяется по ее диаметру d ($l = 30 d$).

При разряде в оптимальном режиме около 40 % массы проволоки превращается в газ, а 60 % – в капли расплавленного металла, которые сталкиваются с поверхностью основного материала. Образующиеся при взрывном разряде капли напыляемого металла можно разделить на две группы: частицы размером в несколько микрометров и несколько сотых долей микрометра. Покрытие образуется за счет осаждения на поверхности частиц первой группы, тогда как частицы второй превращаются в аэрозоли. При недостаточном уровне энергии разряда металлическая проволока расплавляется без взрыва, а при чрезмерном уровне – полностью переходит в газообразное состояние. В обоих случаях осуществить напыление невозможно.

Особенность электроимпульсного нанесения покрытий связана с очень малым размером частиц в мелко распыленном состоянии напыляемого материала. При температуре распыления, которая, как считают, близка к точке кипения металла проволоки, все частицы в мелко распыленном состоянии нагреваются равномерно. При столкновении с поверхностью основного материала скорость движения частиц достигает нескольких сотен метров в секунду.

Движение частиц к основному материалу происходит за счет резкого расширения газа при взрыве и вытеснения воздуха из зоны взрыва, что почти полностью исключает окисление частиц и обеспечивает получение плотного покрытия с высокой прочностью сцепления с основным материа-

лом. Недостаток электроимпульсного напыления состоит в том, что его применение ограничено электропроводными материалами. Кроме того, этот способ непригоден для получения покрытий большой толщины.

19.2. Способы газопламенного напыления

19.2.1. Газопламенное нанесение покрытий

Газопламенный способ напыления покрытий состоит в формировании на поверхности изделий слоя частиц напыляемого материала, обладающих достаточным запасом тепловой и кинетической энергии в результате взаимодействия со струей газового пламени. Струя пламени образуется в результате сгорания горючей смеси, вытекающей из сопловых отверстий горелки с большой скоростью. Температура струи горючий газ – кислород при использовании ацетилена достигает 3200 °С, а скорость истечения – от 150... 160 м/с до сверхзвуковой скорости. Попадая в струю, частицы материала нагреваются до жидкого или высокопластичного состояния и приобретают скорость от 20... 80 до 1000 м/с и более. Скорость полета напыляемых частиц зависит от конструкции аппарата, соотношения кислорода и горючего газа в смеси, количества обдувающего газа, расстояния от среза сопла, количества вводимого в пламя напыляемого материала и его плотности, гранулометрического состава и др.

В современных газопламенных распылителях, используемых для напыления защитных покрытий, материал в виде проволоки, гибкого шнура, стержня или порошка подается через сопловой наконечник, в котором концентрично с каналом для прохода материала выполнены каналы для подачи горючей смеси в зону нагрева. При сгорании горючей смеси образуется кольцевое пламя, которое нагревает поступающий материал до высокопластичного или жидкого состояния и переносит его частицы на напыляемую поверхность.

В случае нанесения покрытий с использованием материалов в виде проволоки, гибких шнуров и стержней существует стадия диспергирования, т. е. «сдувание» тонкого слоя расплавленного жидкого материала и дробление его на мелкие частицы. Диспергирование осуществляется потоком сжатого воздуха, который подается в камеру, образованную расположенным концентрично вокруг первого соплового наконечника воздушным соплом. Поток сжатого газа сдувает слой расплавленного металла и с большой скоростью диспергируемые частицы переносятся на напыляемую поверхность. Поэтому один из основных недостатков процесса напы-

ления материалов в форме гибкого шнура и стержня – потери тепловой энергии на диспергирование компактного исходного материала.

Материал, используемый для газопламенного напыления покрытий, не должен разлагаться и возгораться в пламени, должен иметь достаточную разницу между температурами плавления и кипения. Ниже приведена температура пламени для горючих смесей разного состава.

Состав смеси	Температура, °С
Кислород — ацетилен	3100
Кислород — бутан	3100
Кислород — пропан	2760
Кислород — водород	2700
Кислород — светильный газ	2000
Воздух — ацетилен	2325
Воздух — водород	2055
Воздух — светильный газ	1530

В качестве рабочих газов чаще используют ацетилен (ГОСТ 5457-75), кислород (ГОСТ 5583-79), пропан – бутан (ГОСТ 20448-80), азот (ГОСТ 9293-74) или сжатый воздух, очищенный от масла и влаги. Воздух, азот или другой сжатый газ применяют для охлаждения сопловой части горелки и обдува факела пламени. Обдув факела пламени способствует его «обжиму» и повышает скорость полета частиц порошка.

Основные достоинства газопламенного напыления покрытий:

- относительно малое тепловое воздействие на подложку, что позволяет наносить покрытия на поверхность различных материалов, включая пластмассы, дерево, картон и т. п.;
- толщина покрытия может быть обеспечена от 50 мкм до 10 мм и более;
- возможность регулирования газового режима работы горелки позволяет управлять химическим составом среды (восстановительная, нейтральная, окислительная) и энергетическими характеристиками струи и напыляемых частиц;
- высокая производительность процесса (например, 8... 10 кг/ч для порошков самофлюсующихся сплавов при расходе ацетилена 0,9 м³/ч) и высокий коэффициент использования материала (0,60... 0,95);
- возможность нанесения покрытий на изделия практически без ограничения их размеров при наличии необходимых средств механизации и обеспечения правил техники безопасности;
- низкий уровень шума и излучений;
- возможность нанесения покрытий при любом пространственном положении аппарата;

- легкость и простота обслуживания оборудования;
- гибкость технологии и мобильность оборудования, что позволяет осуществлять напыление на месте, без демонтажа изделий;
- возможность автоматизации процесса и встройки в автоматическую линию с небольшими затратами и др.

Основными недостатками газопламенного способа напыления покрытий из порошковых материалов являются:

- недостаточная прочность сцепления покрытий с основой (5... 45 МПа) при испытании на нормальный отрыв;
- наличие пористости (обычно в пределах 5... 25 %), которая препятствует применению покрытий в коррозионных средах без дополнительной обработки;
- невысокий коэффициент использования энергии газопламенной струи на нагрев порошкового материала (2... 12 %).
- потери тепловой энергии на диспергирование компактного исходного материала (форма гибкого шнура и стержня).

19.2.2 Детонационно-газовое напыление

Принципиальная схема детонационного напыления показана на рис. 19.5.

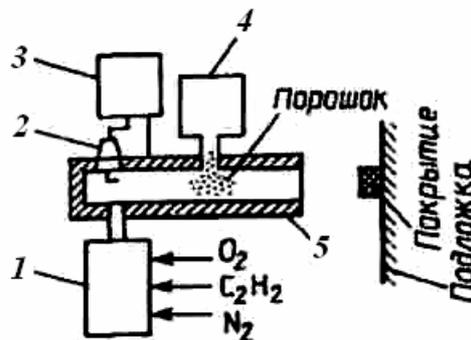


Рис. 19.5. Принципиальная схема детонационного напыления:

- 1 – блок подачи газов; 2 – воспламенитель; 3 – блок инициирования взрыва;
4 – блок подачи напыляемого порошка; 5 – ствол

Устройства для осуществления процесса состоят из открытого с одного конца ствола 5, блоков подачи напыляемого порошка 4 и газов 1, блока инициирования взрыва 3 с воспламенителем 2.

С помощью блока 1 ствол заполняется смесью газов, способных детонировать; из блока 4 в ствол подается заданная навеска напыляемого порошка; блок 3 вырабатывает иницирующий импульс, который подается на воспламенитель 2. Вблизи воспламенителя температура поднимается выше критической ($T_{кр} \approx 620 \text{ K}$), например, проскакивает искра. Воспламенитель под-

жигает смесь газов, обычно у закрытого конца ствола. По смеси газов распространяется пламя с увеличивающейся скоростью. Пройдя определенное расстояние, горение переходит в детонацию, т. е. с этого момента по трубе распространяется детонационная волна со скоростью, постоянной для данной геометрии ствола и состава газа. Детонационная волна представляет собой комплекс ударной волны и зоны химической реакции.

В ударной волне газ сжимается до нескольких десятков атмосфер. При этом температура повышается до нескольких тысяч градусов Цельсия и становится значительно больше критической, при которой газовая смесь вступает в реакцию.

Таким образом, впереди распространяется ударная волна, за ней – зоны химической реакции и продуктов детонации. Последние имеют высокие давление и температуру. Они перемещаются за детонационной волной со скоростью, меньше скорости детонационной волны D на скорость звука M . Достигнув ствола, детонационная волна разрушается, так как может перемещаться только по смеси газов, способной детонировать. Затухающая ударная волна может перемещаться вне ствола, но на расстоянии более 100 мм ее амплитуда близка к нулю. Продукты детонации начинают истекать из ствола в виде сверхзвуковой нерасчетной струи: температура и давление продуктов детонации в стволе уменьшаются; истечение происходит до тех пор, пока давление продуктов на выходе из ствола не становится равным атмосферному, после чего окружающий воздух засасывается в ствол сначала вблизи стенок, а затем по всему сечению и заполняет большую его часть.

При истечении продукты детонации увлекают за собой напыляемые частицы. Формируется двухфазный поток, состоящий из продуктов детонации и напыляемых частиц. Двухфазный поток неоднороден по длине и сечению ствола. Это обусловлено нестационарностью процесса истечения и различием физико-химических и геометрических характеристик напыляемых частиц. Продукты детонации нагревают и ускоряют напыляемые частицы. При этом могут иметь место процессы их плавления и испарения.

После выхода двухфазного потока из ствола продукты детонации резко расширяются. Их температура, скорость и плотность уменьшаются при удалении от ствола, но не монотонно. Вблизи поверхности обрабатываемой детали (подложки) скорость потока газа снижается, и он растекается вдоль преграды. У подложки создается пограничный слой, в котором скорость частиц может резко снизиться. Часть частиц увлекают продукты детонации, обтекающие подложку.

Процесс формирования детонационных покрытий во многом подобен формированию плазменных покрытий, которое в основном включает-

ся в растекании и кристаллизации жидких частиц по поверхности подложки или предыдущих слоев покрытия.

При напылении материалов, имеющих однородный химический состав, например металлов или оксидов, покрытие может формироваться из почти полностью расплавленных частиц и смеси расплавленного и нерасплавленного материалов. При напылении некоторых композиционных материалов, например твердого сплава ВК, напыление осуществляется из смеси расплавленного кобальта и твердых частиц карбида вольфрама.

Основными технологическими параметрами, которые оказывают влияние на качество детонационных покрытий, являются:

- химический состав порошка,
- состав детонирующей газовой смеси,
- средняя грануляция напыляемого порошка,
- расположение порошка в стволе в момент инициирования детонации,
- дистанция напыления,
- навеска порошка на один выстрел,
- режим подготовки поверхности основного металла,
- геометрические характеристики стволов детонационно-газовых установок.

При оптимизации этих параметров под качеством покрытий обычно подразумевают их пористость и толщину в результате единичного выстрела а также прочность сцепления с изделием.

Варьируя технологические параметры детонационного напыления, можно управлять процессами физико-химических превращений в порошках при нанесении слоев, а следовательно, регулировать состав и свойства формируемых оболочек. Возможность регулирования и особенности рассматриваемой технологии (температура частиц порошка достигает 2273... 2773 К, скорость частиц – 800... 1000 м/с) обеспечивают ее основные преимущества: высокую прочность сцепления (100... 170 МПа) и низкую пористость (менее 1 %) покрытий. При этом можно напылять любые материалы на различные подложки без изменения свойств основного металла.

Таким образом, преимуществами детонационно-газового напыления являются:

- умеренный нагрев покрываемой поверхности изделия (не выше 250 °С);
- возможность получения покрытий с повышенной прочностью сцепления и плотностью благодаря высокой кинетической энергии частиц напыляемого материала;

– возможность нанесения прочно сцепленных покрытий на некоторые виды подложек (сталь, никелевые сплавы и др.) без струйно-абразивной подготовки поверхности;

– относительная простота конструкции установки.

Способ имеет ряд недостатков:

– высокий уровень шума (125... 140 дБ) и другие вредные воздействия требуют изоляции зоны обработки;

– определенные технологические ограничения на получение покрытий из материалов, содержащих элементы, которые активно взаимодействуют с компонентами среды (высокотемпературным потоком продуктов детонации сложного состава, содержащих CO_2 , CO , H_2O , H_2 , O_2 , N_2 , H , O , N);

– технологические ограничения на обработку нежестких деталей, вызванные высокими импульсными давлениями при воздействии струи продуктов детонации на подложку;

– ограничения по твердости напыляемой поверхности (не выше 60 HRC).

В качестве рабочих газов используют азот (ГОСТ 9293-74), кислород (ГОСТ 5583-79), ацетилен (ГОСТ 5457-75), пропан-бутан (ГОСТ 20448-80).

Контрольные вопросы

1. В чем заключаются сущность процесса напыления?
2. Какие существуют способы электротермического напыления?
3. Как осуществляется процесс электродуговой металлизации? Назовите основные технологические параметры процесса.
4. Что представляет собой процесс плазменного напыления? Какие существуют схемы плазменных горелок? Назовите основные технологические параметры способа.
5. Какими преимуществами и недостатками обладает плазменное напыление?
6. В чем сущность подводного плазменного напыления? Какими положительными факторами обладает этот процесс?
7. Как осуществляется электроимпульсное нанесение покрытий? Приведите схему и основные характеристики процесса.
8. В чем заключается способ газопламенного напыления покрытий? Какие основные достоинства и недостатки способа?
9. Что представляет собой детонационно-газовое напыление? Приведите схему процесса.
10. Какими технологическими параметрами обладает процесс детонационно-газового напыления? Какие существуют преимущества и недостатки способа?

РАЗДЕЛ 5. ПАЙКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

20. ПАЙКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

20.1. Сущность процесса пайки

Пайка является широко распространенным процессом, как при изготовлении, так при ремонте деталей. Этот способ известен людям уже 3 – 5 тысяч лет. При раскопках находят паянные медно-серебряным припоем трубы, украшения, оружие. Пайка является незаменимым процессом в радиоэлектронике, самолето- и ракетостроении, автотракторостроении. С помощью пайки изготавливаются радиаторы, трубопроводы, электрооборудование и др. Процесс пайки легко поддается механизации и автоматизации.

Пайкой называют процесс получения неразъемного соединения заготовок без их расплавления путем смачивания поверхностей жидким припоем с последующей его кристаллизацией. Образование соединения без расплавления основного металла обеспечивает при необходимости возможность распая соединения.

Пайка выполняется в следующей последовательности:

1. Нагрев спаиваемых деталей до температуры, близкой к температуре плавления припоя.
2. Расплавление припоя и нанесение его на предварительно обработанные детали.
3. Заполнение припоем шва.
4. Растворение основного металла в расплавленном шве и взаимная диффузия металлов.
5. Кристаллизация шва.

Для выполнения пайки необходимо, чтобы частицы расплавленного припоя вступали в прочный контакт с поверхностями соединяемых деталей. Капля расплавленного припоя растекается (рис. 20.1) по поверхности до определенного предела.

Пайка возможна, когда припой хорошо смачивает твердое тело. Если жидкость не смачивает твердое тело, то пайка невозможна. Хорошего смачивания можно добиться соответствующей подготовкой поверхности (механическая обработка для удаления окислов, обезжиривание для удаления жировых загрязнений) и подбором припоя и флюса. При хорошем смачивании заполняются все зазоры и поры, и обеспечивается прочное соединение деталей.

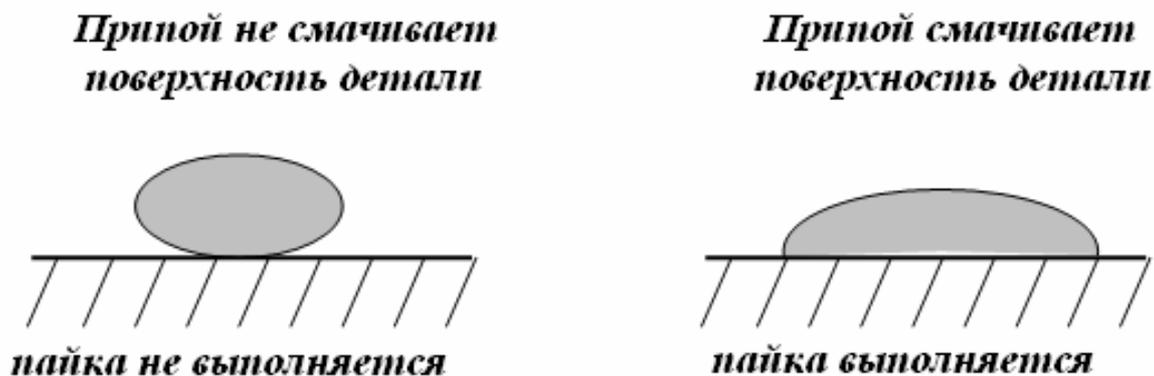


Рис. 20.1. Смачивание поверхности детали припоем

Хотя процесс пайки является, в некоторой степени, родственным сварке, но имеет ряд отличий.

20.2. Методы, применяемые при пайке изделий

По условиям заполнения зазора пайку можно разделить на **капиллярную и некапиллярную**.

При **капиллярной пайке** припой заполняет зазор между соединяемыми поверхностями и удерживается в нем за счет капиллярных сил (рис. 20.2).

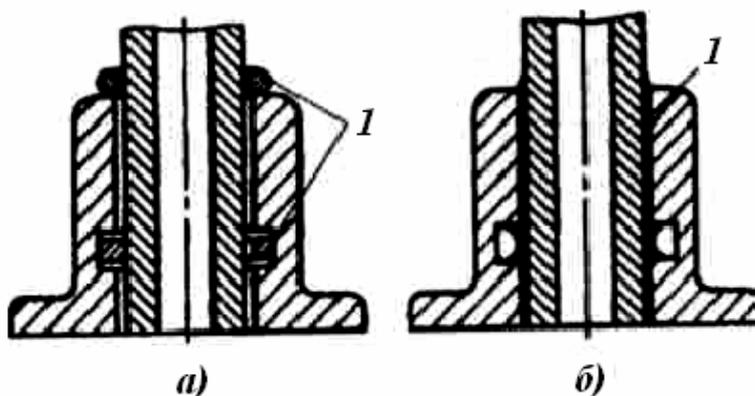


Рис. 20.2. Схема капиллярной пайки:
а – перед пайкой; *б* – после пайки; *1* – припой

Соединение образуется в результате растворения основы в жидком припое и последующей кристаллизации раствора. Капиллярную пайку используют при соединении внахлестку.

По механизму образования шва капиллярную пайку подразделяют на диффузионную, контактно-реактивную, реактивно-флюсовую.

При **диффузионной пайке** соединение образуется за счет взаимной диффузии компонентов припоя и паяемых материалов, причем возможно

образование в шве твердого раствора или тугоплавких хрупких интерметаллидов. Для диффузионной пайки необходима продолжительная выдержка при температуре образования паяного шва, и после завершения процесса – при температуре ниже солидуса припоя.

При контактно-реактивной пайке между соединяемыми металлами или соединяемыми металлами и прослойкой промежуточного металла в результате контактного плавления образуется сплав, который заполняет зазор и при кристаллизации образует паяное соединение (рис. 20.3).

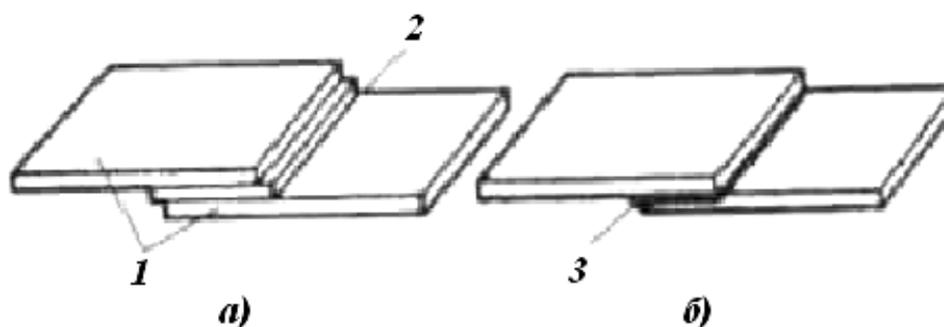
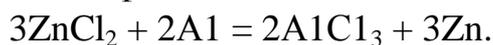


Рис.20.3. Схема контактно-реактивной пайки:

а – перед пайкой; б – после пайки;

1 – медь; 2 – серебро; 3 – эвтектический сплав меди с серебром

При реактивно-флюсовой пайке припой образуется за счет реакции вытеснения между металлом (основным) и флюсом. Например, при пайке алюминия с флюсом восстановленный цинк служит припоем:



Реактивно-флюсовую пайку можно вести без припоя и с ним.

К некапиллярным способам относятся пайка-сварка и сварка-пайка.

При пайке-сварке соединения образуются так же, как и при сварке плавлением, но в качестве присадочного металла применяют припой (рис. 20.4).

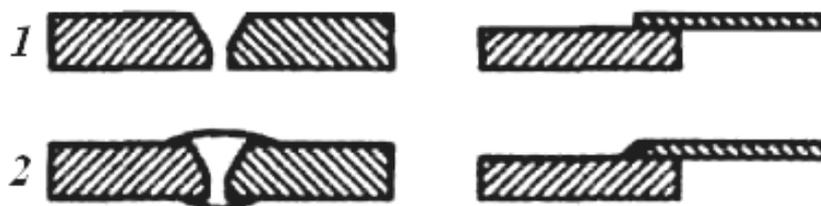


Рис. 20.4. Схема пайки-сварки:

а – без оплавления кромок деталей;

б – с оплавлением кромок одной детали;

1 – до пайки; 2 – после пайки

При сварке-пайке соединяют разнородные материалы с применением местного нагрева. Более легкоплавкий материал при достижении температуры плавления исполняет роль припоя.

Наибольшее применение получили капиллярные способы пайки и пайка-сварка.

20.3. Материалы для пайки

Качество паяных соединений (прочность, герметичность, надежность и др.) зависит от правильного выбора основного металла, припоя, флюса, способа нагрева, зазоров, типа соединения.

По прочности паяные соединения уступают сварным. При этом *пайка имеет некоторые технологические преимущества перед сваркой:*

1. Дает возможность соединения разнородных металлов и даже металла с неметаллом.

2. Температура нагрева детали при пайке значительно ниже, чем при сварке. При пайке нет значительных остаточных деформаций, и не происходит коробления, не расплавляются кромки и не изменяется структура и механические свойства соединяемых деталей.

3. Простота технологического процесса, хорошие условия для автоматизации и механизации пайки, высокая производительность труда.

Паять можно углеродистые и легированные стали всех марок, твердые сплавы, цветные металлы, серые и ковкие чугуны. При пайке металлы соединяются в результате смачивания, растекания жидкого припоя по нагретым поверхностям и затвердевания его после охлаждения. Прочность сцепления припоя с соединяемыми поверхностями зависит от физико-химических и диффузионных процессов, протекающих между припоем и основным металлом, и, как правило, определяется прочностными характеристиками припоя.

Основные требования к припоям:

1. Хорошо растворять основной металл.

2. Иметь температуру плавления как минимум на 50... 100 °С ниже температуры плавления паяемых металлов.

3. Обеспечивать хорошее смачивание металла и хорошее заполнение шва пайки.

4. Образовывать прочные, пластичные и коррозионно-устойчивые швы.

5. Иметь коэффициент линейного расширения не отличающийся резко от коэффициента линейного расширения паяемых металлов.

6. Быть дешевым и недефицитным.

Припои представляют собой сплавы цветных металлов сложного состава. Все припои по температуре плавления подразделяют на особолегкоплавкие (температура плавления < 145 °С), легкоплавкие (145... 450 °С), среднеплавкие (450... 1100 °С) и тугоплавкие (> 1050 °С).

К особолегкоплавким и легкоплавким припоям относятся оловянно-свинцовые на основе висмута, индия, кадмия, цинка, олова, свинца; к средне- и высокоплавким припоям – медные, медно-цинковые, медно-никелевые, с благородными металлами (серебром, золотом, платиной).

Припои изготавливают в виде прутков, проволок, листов, полос, спиралей, дисков, колец, зерен и др., укладываемых в место соединения.

Изделия из алюминия и его сплавов паяют с припоями на алюминиевой основе с кремнием, медью, оловом и другими металлами. Магний и его сплавы паяют припоями на основе магния с добавками алюминия, меди, марганца и цинка. Изделия из коррозионно-стойких сталей и жаропрочных сплавов, работающих при высоких температурах (свыше 500 °С), паяют тугоплавкими припоями на основе железа, марганца, никеля, кобальта, титана, циркония, гафния, ниобия и палладия.

Флюсы паяльные применяют для очистки поверхности паяемого материала, а также для снижения поверхностного натяжения и улучшения растекания и смачиваемости жидкого припоя. Флюс (кроме реактивно-флюсовой пайки) не должен химически взаимодействовать с припоем. Температура плавления флюса должна быть ниже температуры плавления припоя. Флюс в расплавленном и газообразном состояниях должен способствовать смачиванию поверхности основного металла расплавленным припоем.

Флюсы могут быть твердые, пастообразные и жидкие. Для пайки наиболее применимы следующие флюсы: бура $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, борная кислота H_3BO_3 , хлористый цинк ZnCl_2 , фтористый калий KF и др.

20.4. Способы пайки

Пайку можно вести при общем или местном нагреве конструкции. При общем нагреве изделие помещают в печь или погружают в соляную или металлическую ванну. В этих условиях изделие прогревается равномерно. Такой процесс целесообразен для пайки изделий относительно небольших размеров. При местном нагреве подогревают лишь часть конструкции в зоне спая.

Способы пайки классифицируют в зависимости от используемых источников нагрева. Наиболее распространены в промышленности:

- Пайка при помощи паяльника.
- Пайка газовым пламенем.
- Индукционная пайка.

- Пайка в печах.
- Пайка электроконтактным нагревом.
- Пайка погружением.
- Пайка кварцевыми лампами.
- Экзотермическая пайка.
- Пайка с приложением внешних сил.
- Пайка с наложением упругих колебаний.

Пайка при помощи паяльника

При пайке паяльниками основной металл нагревают, а припой расплавляют за счет теплоты, аккумулированной в массе металла паяльника, который перед пайкой или в процессе ее подогревают. Для низкотемпературной пайки применяют паяльники с периодическим нагревом, с непрерывным нагревом и ультразвуковые. Рабочую часть паяльника выполняют из красной меди. Паяльник с периодическим нагревом в процессе работы периодически подогревают посторонним источником теплоты. Паяльники с постоянным нагревом делают электрические. Паяльники с периодическим и непрерывным нагревом чаще используют для флюсов пайки черных и цветных металлов легкоплавкими припоями с температурой плавления ниже 300... 350 °С.

Ультразвуковые паяльники применяют для бесфлюсовой пайки на воздухе и пайки алюминия. Оксидные пленки разрушаются в результате колебаний ультразвуковой частоты.

Пайка газовым пламенем

При газопламенной пайке заготовки нагревают и припой расплавляют горелками для газовой и плазменной сварки или паяльными лампами. Газовым пламенем паяют вручную и механизированным способом. При пайке газосварочными горелками в качестве горючих газов используют ацетилен, природные газы, водород, пары керосина и т. п. При использовании газового пламени припой можно заранее помещать у места пайки или вводить в процессе пайки вручную. Газовое пламя лишь частично предохраняет место спая от окисления, поэтому рекомендуется применение флюсов и паст. Поэтому на место пайки предварительно наносят флюс в виде жидкой пасты, разведенной водой или спиртом; конец прутка припоя также покрывают флюсом. В некоторых случаях флюсы подаются в газообразном состоянии непосредственно в пламя. При газовой пайке возможно применение высокотемпературных и легкоплавких припоев.

Для крупных деталей иногда применяют процесс пайки, называемый «сварка бронзой». В этом случае припоем служат латунные стержни, изде-

лие нагревают кислородно-ацетиленовой горелкой. Сначала ее подогревают кромки, насыпают флюс, облуживают их тонким слоем припоя, а затем заполняют припоем весь объем разделки. Сварку бронзой используют при ремонте чугунных и стальных деталей.

Плазменной горелкой, обеспечивающей более высокую температуру нагрева, паяют тугоплавкие металлы: вольфрам, тантал, молибден, ниобий и т. п.

Индукционная пайка

При индукционной пайке паяемый участок нагревают в индукторе. Через индуктор пропускают ТВЧ, в результате чего место пайки нагревается до необходимой температуры. Схема пайки индукционным нагревом приведена на рис. 20.5.

На рис. 20.5, *а* и *б* показано применение, в качестве припоя, проволоки, на рис. 20.5, *в* – плоского кольца. Во всех случаях детали помещают в магнитное поле индуктора. В результате воздействия на металл изделия магнитного поля образуются вихревые токи, которые и вызывают нагрев деталей. Интенсивность нагрева зависит от типа индуктора, мощности генератора, рода металла, размера конструкции и т. д. Индуктор выполнен в виде петли или спирали из красной меди. Формы и размеры индуктора зависят от конструкции паяемого изделия.

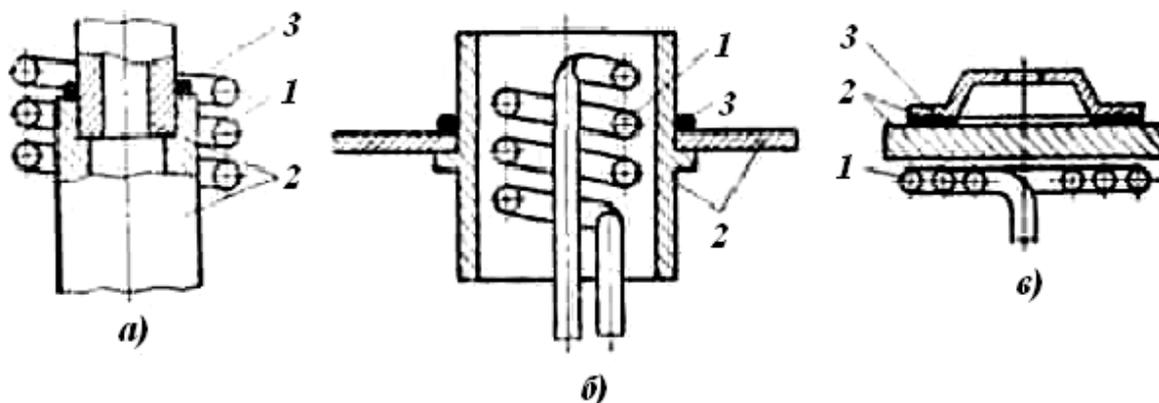


Рис. 20.5. Основные виды индукторов для пайки: *а), б)* – припой – проволока; *в)* – припой – плоское кольцо; *1* – индуктор; *2* – детали; *3* – припой

Требуемую равномерность нагрева регулируют величиной тока. При очень быстром нагреве иногда возможна пайка без флюса, так как при применении легкоплавких припоев окисление не успевает произойти. В других случаях паять необходимо при защите флюсами, в камерах с инертным газом (аргоном) или в вакуумных камерах.

Механизировать процесс индукционной пайки можно разными способами, например, поместить детали на конвейер и подавать их под индуктор с таким расчетом, чтобы продолжительность паузы в движении конвейера была достаточной для нагрева детали, подлежащей соединению. В качестве источников тока при индукционной пайке используют машинные генераторы с частотой 2500 – 8000 Гц и ламповые – с частотой 250 – 300 тыс. Гц.

Пайка в печах

При пайке в печах соединяемые заготовки нагревают в специальных печах: электросопротивления, с индукционным нагревом, газопламенных и газовых. Припой заранее закладывают в шов собранного узла, на место пайки наносят флюс и затем изделие помещают в печь, где его нагревают до температуры пайки. Припой расплавляется и заполняет зазоры между соединяемыми заготовками. Процесс пайки продолжается несколько часов. Этот способ обеспечивает равномерный нагрев соединяемых деталей без заметной их деформации.

Для этого способа наиболее часто применяют высокотемпературные припои, редко – низкотемпературные. Пайка в печах обеспечивает равномерный нагрев и охлаждение конструкции, легко механизуется; это очень экономичный процесс при массовом и крупносерийном производствах, позволяет получать высокопрочные паяные соединения в труднодоступных местах.

В воздушной среде пайку ведут, как правило, при относительно низких температурах легкоплавкими припоями. Этим способом паяют, например, соты автомобильных радиаторов и другие изделия из алюминиевых сплавов.

При пайке в восстановительной атмосфере наиболее часто применяют водород или смеси, состоящие из водорода и окиси углерода и других газов. Такая атмосфера в печах позволяет восстанавливаться образующиеся окислы металлов. Ее активность определяется родом окислов. Чистый водород взрывоопасен и дорог, поэтому чаще применяется диссоциированный аммиак или продукты его частичного сгорания.

Пайка в среде инертных газов, а также в вакууме позволяет полностью избежать окисления основного металла и припоя. Более того, при пайке в вакууме достаточно хорошо очищаются поверхности вследствие растворения или сублимации поверхностных пленок некоторых окислов.

Пайку в вакуумных печах или в среде нейтральных газов, как и в восстановительной атмосфере, можно проводить непосредственно в особых печах или контейнерах. Для этого применяют жесткие и мягкие контейнеры, целиком загружаемые в печь. При пайке в вакууме жесткий контейнер должен быть рассчитан на прочность и устойчивость под внешним давлением 1 ат при работе в условиях высоких температур, мягкий контейнер облегает изделие, подлежащее пайке, и не требует специального расчета прочности при его нахождении в вакуумных печах.

Пайка электроконтактным нагревом

Пайка происходит за счет теплоты, выделяющейся в деталях при протекании по ним электрического тока. Нагревать можно разными путями. Во-первых (рис. 20.6, а), пропусканием тока от электродов 1 через обе детали 5 и место их соединения, в этом случае припой 6 закладывают между деталями; во-вторых (рис. 20.6, б), пропусканием тока через одну деталь 4, вторая деталь 3 нагревается за счет теплопроводности; эта схема удобна в тех случаях, когда одна из деталей имеет размеры значительно меньше другой; в-третьих (рис. 20.6, в), пропусканием тока через особый нагреватель 2; последний обеспечивает нагрев обеих деталей 5 за счет теплопроводности; этот способ удобен при относительно малых размерах соединяемых частей, припой 6 при этом закладывают в форме прутков или вносят в процессе пайки.

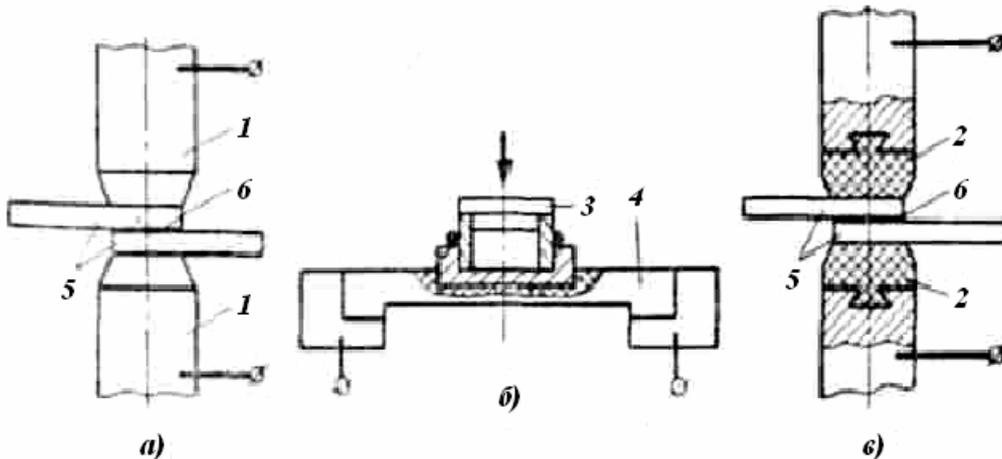


Рис. 20.6. Варианты электронагрева при контактной пайке:

- а) – пропускание тока через две детали; б) – пропускание тока через одну деталь;
- в) – пропускание тока через специальный нагреватель

При контактном способе паять можно и без флюсов, хотя их нередко применяют в соответствии с родом припоев. При пайке электроконтактным паяльником одну из деталей включают в электрическую систему, питаемую от трансформатора. В эту систему последовательно включают угольный электрод. В месте его контакта с деталью происходит нагрев; вторая деталь нагревается от первой за счет теплопроводности.

Пайка погружением

Пайку погружением выполняют в ваннах с расплавленными солями или припоями. Соляная смесь обычно состоит из 55 % KCl и 45 % $NaCl$. Температура ванны 700... 800 °С. На паяемую поверхность, предварительно очищенную от грязи и жира, наносят флюс, между кромками или около места соединения размещают припой, затем детали скрепляют и погружа-

ют в ванну. Соляная ванна предохраняет место пайки от окисления. Перед погружением в ванну с расплавленным припоем покрытые флюсом детали нагревают до температуры 550 °С. Поверхности, не подлежащие пайке, предохраняют от контакта с припоем специальным покрытием из графита с добавками небольшого количества извести. Пайку погружением в расплавленный припой используют для стальных, медных и алюминиевых сплавов, деталей сложных геометрических форм. На этот процесс расходуется большое количество припоя.

Пайка кварцевыми лампами

Сущность процесса пайки кварцевыми лампами заключается в следующем. Паяемую конструкцию помещают в мягкий контейнер. Его вакуумируют, а затем наполняют аргоном. Далее контейнер помещают в приспособление, в котором его закрепляют. С двух сторон контейнера устанавливают батареи кварцевых ламп. После окончания обогрева кварцевые лампы отводят, а приспособление совместно с деталями охлаждают. Весь цикл процесса пайки по этому способу продолжается 5 – 15 мин, в то время как продолжительность пайки в печах составляет несколько часов.

Существуют и другие способы пайки. Например, с использованием графитовых листовых нагревателей и т. д., но эти способы применяют редко.

Экзотермическая пайка

Способ экзотермической пайки состоит в следующем. На очищенную поверхность аустенитной коррозионно-стойкой стали, подлежащей соединению, наносят тонкий слой порошкообразного флюса. Флюс можно наносить методом напыления. Соединяемые поверхности совмещают, на противоположные стороны укладывается экзотермическая смесь, выделяющая теплоту. Смесь состоит из разных компонентов, укладываемых в форме пасты или брикетов толщиной несколько миллиметров.

Собранную конструкцию устанавливают в приспособление и вносят в специальную печь, где экзотермическую смесь поджигают. Смесь загорается при температуре 500 °С (773 К), при этом на поверхности металла достигается температура, обеспечивающая расплавление припоя. Таким путем можно паять соединения внахлестку, а также сотовые блоки – конструкции небольших размеров, например 75 × 100 мм. При пайке сотовых конструкций требуется очень небольшое количество экзотермической смеси, значительно меньшее, чем для соединений внахлестку. В процессе испытаний сотовых конструкций установлено, что при приложении сжимающего усилия параллельно ребру разрушающее напряжение в аустенитных сталях достигает 120 кгс/мм² (1176,8 · 10⁵ Н/м²).

Пайка с приложением внешних сил

Этот способ пайки применим к парам металлов, способных образовывать между собой эвтектики или непрерывный ряд твердых растворов с минимумом температур плавления. Так, например, медь и серебро образуют сплав с температурой плавления около 780 °С (1053 К). Одна из схем способа пайки с приложением внешних сил изображена на рис. 20.7.

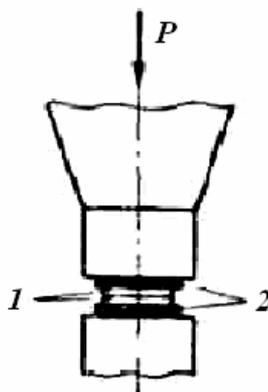


Рис. 20.7. Пайка с применением графитовых пластин:
1 – детали; 2 – графитовые пластины; S = 3 мм

С двух сторон соединяемых образцов укладывают графитовые пластины. Детали плотно сжимают значительным усилием.

От сварочной машины мощностью несколько десятков киловатт через соединяемые детали пропускают ток при напряжении во вторичной обмотке около 3 В. Соединяемые детали нагреваются. На границе образуется эвтектический сплав, толщина переходного слоя увеличивается со временем. При отсутствии графитовых пластин электролитическая медь, обладающая высокой проводимостью, не нагревается. Графитовые пластины служат для повышения сопротивления и необходимого нагрева меди.

Указанным путем можно паять на точечных машинах некоторые цветные металлы, образующие эвтектические сплавы. Флюс не применяют. Таким же путем можно припаивать серебряные пластины к свинцу, а также сплавы меди к техническому серебру и техническому цинку.

Пайка с наложением упругих колебаний

В настоящее время начинают развиваться методы пайки с использованием упругих колебаний – низкочастотных и ультразвуковых.

Использование низкочастотных колебаний при обычных способах пайки способствует улучшению качества паяных швов. Обычно для создания низкочастотных колебаний используют электромагнитные вибраторы.

Последние жестко соединяют с приспособлениями, в которых зажимают детали, подлежащие пайке.

Амплитуды колебаний, передаваемые деталям, незначительны. Они составляют сотые доли миллиметра. Частоты колебаний также невелики, например, около 100 Гц. Вибраторы подают колебания в течение времени с начала подачи припоя и до полной его кристаллизации. Наложение упругих колебаний позволяет получить хорошие соединения на деталях с зазором 0,02 – 0,2 мм. При небольших зазорах наложение упругих колебаний улучшает заполнение зазора припоем. При больших зазорах колебания устраняют рыхлоты и обеспечивают получение плотных швов.

Введение ультразвуковых упругих колебаний в расплавленный припой способствует разрушению поверхностной пленки в местах пайки, покрытых припоем и смачиванию им металла. Механизм разрушения поверхностной пленки состоит в возникновении явления кавитации в расплавленном припое. При введении ультразвуковых упругих колебаний в расплавленный припой в нем образуется много кавитационных пузырьков. При захлопывании пузырьков на поверхности металла возникает кавитационная эрозия, вследствие чего и происходит удаление поверхностных окисных пленок.

20.5. Общие технологические указания

Выбор припоя при пайке определяется несколькими условиями.

Необходимо правильно установить температуру плавления припоя, которая должна быть ниже температуры плавления основного металла, подлежащего пайке. Следует учитывать, что температура припоев в паяных соединениях нередко изменяется по сравнению с температурой плавления в исходном состоянии. Это объясняется изменением химического состава припоя при пайке вследствие выгорания, а также химического взаимодействия при соприкосновении припоя с основным металлом.

При пайке должно быть выдержано *следующее условие*:

$$T_1 < T_2 < T_3 < T_4, \quad (20.1)$$

где T_1 – наивысшая температура изделия при эксплуатации;

T_2 – температура плавления припоя;

T_3 – температура плавления припоя при пайке;

T_4 – температура плавления основного металла.

Если изделия после пайки подвергаются термообработке при температуре T_5 , то T_5 должна быть ниже той температуры, которая может оказать вредное влияние на механические свойства. Если требуется спаять несколько соединений через определенные интервалы времени, то температура плавления припоя при каждой последующей операции должна быть ниже предыдущей для

предупреждения распайки ранее полученных соединений. Физические свойства припоя – смачиваемость, капиллярность и др. – учитывают при разработке технологических процессов пайки конкретных металлов.

Перед самым процессом пайки надлежит провести некоторые подготовительные операции.

Паяемые поверхности должны быть очищены от загрязнений и окислов. Детали очищают от жиров и масел путем их подогрева в различных щелочных растворах. Под действием щелочей жиры переходят в раствор. Оставшиеся жировые пленки могут быть удалены бензином, четыреххлористым углеродом и т. д. Мелкие детали хорошо очищаются, если их подвергнуть воздействию ультразвуковых колебаний. Образовавшуюся в процессе термообработки на поверхностях детали окалину, удаляют травлением или путем обдувки поверхности дробью.

Травление проводят в растворе серной или соляной кислоты с последующим погружением в щелочь и промывкой. Травление не только удаляет окисные пленки, но и способствует созданию микрорельефа поверхности, который благоприятен в отношении процесса пайки.

Перед пайкой для улучшения смачиваемости поверхностей и растекаемости припоя на них наносят тонкие металлические слои. Слои можно наносить гальваническим методом. При этом они защищают поверхность от внешних воздействий. После растекания по ним припоя слои становятся ненужными. В процессе пайки они могут растворяться и удаляться. Если необходимо сохранить покрытие в течение всего процесса пайки, например при соединении титановых деталей, то это следует учитывать при выборе припоя, флюса и при разработке всех технологических операций.

Типы паяных соединений разнообразны. Они зависят от геометрической формы соединяемых элементов и рода применяемых припоев. Требования к паяным соединениям также различны. В одних случаях от паяных соединений требуется только герметичность, в других – прочность, в третьих – прочность и герметичность, в четвертых – надежность электрического контакта. Иногда паяные соединения, которые должны обладать высокой электропроводностью разгружают от рабочих усилий применением винтов, болтов и других видов соединений. При пайке высокотемпературными припоями особенно целесообразны соединения встык прямым швом или встык косым швом; эти соединения называются соединениями «в ус» (рис. 20.8, а). В соединении этого типа почти совершенно отсутствует концентрация напряжения; они в равной мере хороши для работы под статическими и переменными усилиями.

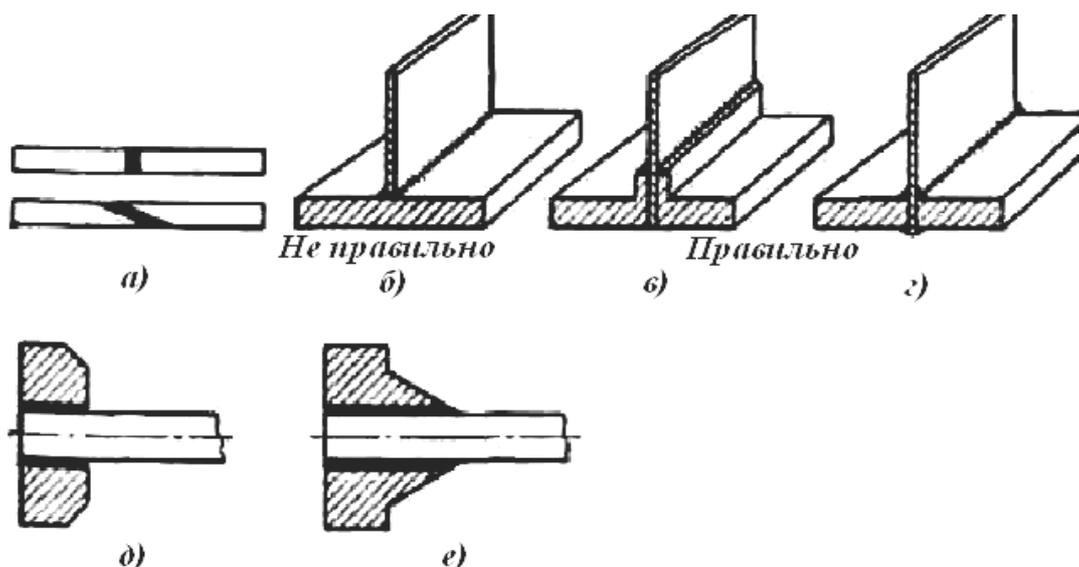


Рис. 20.8. Примеры паяных соединений:
a) – соединения «в ус»; *б) – e)* – соединения в тавр

На рис. 20.8, *б – e* приведены примеры *паяных соединений в тавр*. Соединения, указанные на рис. 20.8, *б*, имеют относительно малую плоскость спая, поэтому их нельзя признать рациональными и можно применять при статических нагрузках и небольших рабочих усилиях. В соединениях, приведенных на рис. 20.8, *в*, припой расположен по плоскостям соприкосновения уголков с вертикальным листом. Он способствует образованию значительных плоскостей спая, обеспечивающих прочность соединения. На рис. 20.8, *д, e* приведены примеры *рациональной и нерациональной конструкции паяных соединений*. В первом случае возникает резкая концентрация напряжений, что значительно ухудшает работу соединения, во втором случае концентрация почти отсутствует, чему способствует плавное изменение размеров соединяемых частей. При пайке легкоплавкими припоями прочность соединений достигается, главным образом, за счет увеличения размеров плоскостей спая.

Очень важно в процессе пайки закрепление деталей, предотвращающее какое-либо их взаимное смещение, это – накатка, точечная сварка и др. В последнем случае паяный слой требуется для гарантии герметичности соединения.

Конструкции приспособлений должны обеспечивать возможность сближения элементов, подлежащих пайке, и заполнение зазоров расплавленным припоем. Рекомендуются следующие величины зазоров при пайке различными припоями: серебром 0,05 – 0,125 мм; медью 0,05 мм; алюминий кремнием 0,15 – 0,25 мм при малых толщинах и до 0,6 мм при больших толщинах; медь цинком 0,05 – 0,125 мм.

Контрольные вопросы

1. В чем заключаются сущность процесса пайки? В какой последовательности выполняется процесс пайки?
2. Какие вы знаете методы пайки? Дайте характеристику основным методам пайки.
3. Какие используются материалы для пайки? В чем преимущества пайки перед сваркой?
4. Какие бывают припои и флюсы для пайки? Назовите основные требования, предъявляемые к припоям.
5. Приведите основные способы пайки и дайте краткую характеристику каждому.
6. Как осуществляется выбор припоя? Какие операции осуществляются при пайке?

РАЗДЕЛ 6. СВАРКА ПЛАСТМАСС

21. СВАРКА ПЛАСТМАСС

21.1. Общие сведения о свариваемости пластмасс

Сварка пластмасс является высокопроизводительным, надежным и экономичным процессом получения неразъемных соединений. Практически можно сваривать все термопласты.

Характеристика многотонажных пластмасс, из которых изготовляют сварные конструкции, приведена в табл. 21.1.

Таблица 21.1

Свойства наиболее распространенных термопластов

Термопласт	Плотность, г/см ³	σ_p	σ_T	Температура плавления, °С
		кгс/см ²		
Полиэтилен: высокого давления (ПЭВД)	0,918-0,935	120-160	90-100	105-108
низкого давления (ПЭНД)	0,945-0,955	220-250	220-260	120-125
Полипропилен (ПП)	0,9-0,91	250-400	250-350	160-170
Жесткий пластифицированный поливинилхлорид (ПВХ)	1,38-1,40	450-700	450	170-200
Полистирол	1,05-1,18	400-450	-	160-190
Полиамид	1,10	500-580	-	215-221

Термопласт	Удельная теплоем- кость кал/(г. °С)	Относи- тельное удлинение при раз- рыве, %	НВ	Тангенс угла ди- электри- ческих потерь при частоте 10 ⁶ Гц	Морозо- стой- кость, °С
Полиэтилен: высокого давления (ПЭВД)	0,50-0,68	150-600	1,4-2,5	(2-3) 10 ⁻⁴	-70
низкого давления (ПЭНД)	0,55	400-800	4,5-5,8	(2-5) 10 ⁻⁴	-60
Полипропилен (ПП)	0,46	200-800	6,3		-15
Жесткий пластифициро- ванный поливинилхлорид (ПВХ)	0,25-0,35	40-50	1-16	(5-18) 10 ⁻³	-10
Полистирол	0,32	1-2	14-20	(2-3) 10 ⁻⁴	-60
Полиамид	0,20	100-150	-	0,06	-60

Сварка пластмасс основана на взаимодействии макромолекул в зоне контакта свариваемых деталей. Это взаимодействие может быть двух типов.

В первом случае для взаимодействия между макромолекулами необходимо перевести материал в зоне сварки в вязкотекучее состояние – расплавить его; поэтому такой вид сварки называют сваркой плавлением.

Во втором случае между взаимодействующими макромолекулами образуются химические связи; поэтому такой вид сварки называют химической.

1. Сварку плавлением применяют при соединении термопластов и ластотермопластов. Она основана на способности полимерных материалов при нагреве выше определенных температур или при набухании (при введении растворителя) переходить в вязкотекучее состояние, которое при приложении давления к соединяемым деталям способствует возникновению межмолекулярного взаимодействия. При этом в зоне контакта протекают реологические процессы (перемешивание расплава, его вытекание, ориентация и др.), которые определяют качество сварного соединения.

Основными параметрами режима сварки являются температура и время нагрева свариваемых деталей, а также давление при сварке и время его приложения. Реакция исходного материала на термомеханический цикл сварки различна. Структура сварного шва отличается от структуры основного материала, что может влиять на эксплуатационные свойства сварной конструкции при работе в агрессивной среде, при знакопеременных нагрузках и т. д. При нагреве ориентированных полимеров до температуры плавления ориентация теряется и первоначальные механические свойства изменяются. К ухудшению механических свойств может привести сварка при температурах, близких к температуре деструкции. Долговечность изделия может уменьшиться вследствие испарения стабилизатора или его вымывания растворителем в зоне шва.

В процессе сварки под действием нагрева, прилагаемых усилий осадки и охлаждения в шве и околошовной зоне возникают местные напряжения и могут образоваться микроскопические трещины. Поэтому сварные швы нерационально подвергать нагрузкам сразу после сварки. Однако, спустя некоторое время, обычно через 8 – 20 ч, собственные напряжения снижаются вследствие релаксации. Процесс релаксации может быть ускорен путем термической обработки стыка.

2. Химическую сварку применяют для соединения отвержденных реактопластов, термопластов с поперечными связями и некоторых термопластов кристаллической и ориентированной структуры. В основе химической сварки лежит процесс образования химических связей между макромолекулами. Она может быть осуществлена за счет функциональных групп свариваемых полимеров или с помощью мостикообразующих веществ, вводимых в сварной шов.

Например, дополнительным нагревом до температур, превышающих температуру отверждения, обеспечивается инициирование химических связей реакционноспособных групп макромолекул в зоне контакта поверхностных слоев деталей из реактопластов на основе фенолоформальдегидных, анилиноформальдегидных и других смол. Присадку в виде резольной смолы добавляют при сварке пластмасс на основе эпоксидных полимеров. Сшитый ПВХ сваривают с присадкой диаминов, наносимых в растворителях.

Химическая сварка эффективна при соединении ориентированных термопластичных пленок и волокон, от сварных швов которых требуется сохранение исходных физико-механических свойств основного материала. При соединении, например, полиамидных пленок в качестве присадочных реагентов используют многоосновные кислоты и их хлорангидриды, а при соединении полиэтилентерефталатной пленки – ангидриды многоосновных кислот или органические перекиси, наносимые на свариваемые поверхности из раствора в кетоне или в смеси с низкомолекулярным полиэфиром – из раствора в полиметилхлориде. Химическая сварка – сшивка может быть выполнена и без присадки при нейтронном или рентгеновском излучении.

21.2. Способы сварки пластмасс

В основу классификации способов сварки положен способ термического воздействия на свариваемые детали (рис. 21.1).

1. Сварка газовым теплоносителем – способ, при котором тепло на свариваемые поверхности подается нагретой струей газа.

Сварку газовым теплоносителем можно производить без присадки либо с присадочным материалом в виде круглого прутка диаметром 2 – 6 мм или прутка другого сечения, а при сварке пленок – в виде ленты шириной 10 – 15 мм. Присадочный материал содержит 3 – 10 % пластификатора. Жесткие пластики толщиной менее 2 мм можно сваривать без разделки и без зазора. Пластики больших толщин сваривают с разделкой кромок, угол раскрытия которых 45 – 70° при зазоре 0,5 – 1,5 мм. Листы и трубы толщиной 4 мм и более сваривают с присадочным прутком за несколько проходов (несколькими слоями).

Сварку с помощью газового теплоносителя без присадочного материала применяют преимущественно при нахлесточных соединениях пленок и листов из мягких термопластов. Скорость механизированной сварки таким способом листов из поливинилхлорида 15 – 20 м/ч. В качестве газа-теплоносителя чаще используют воздух. Можно применять азот, углекислый газ или аргон. Темпе-

ратура газовой струи на выходе из сопла должна превышать температуру перехода пластмассы в вязкотекучее состояние на 50 – 100 °С. Давление газовой струи составляет 0,4 – 0,9 кгс/см² в зависимости от скорости сварки. Скорость сварки однослойного шва 9 – 15 м/ч. Усилие на пруток 0,8 – 1,5 кгс для полиамидов и полиолефинов и 1,5 – 2 кгс для жесткого ПВХ. Мягкий пруток дополнительно прикатывается роликом с усилием 1,5 – 3 кгс.

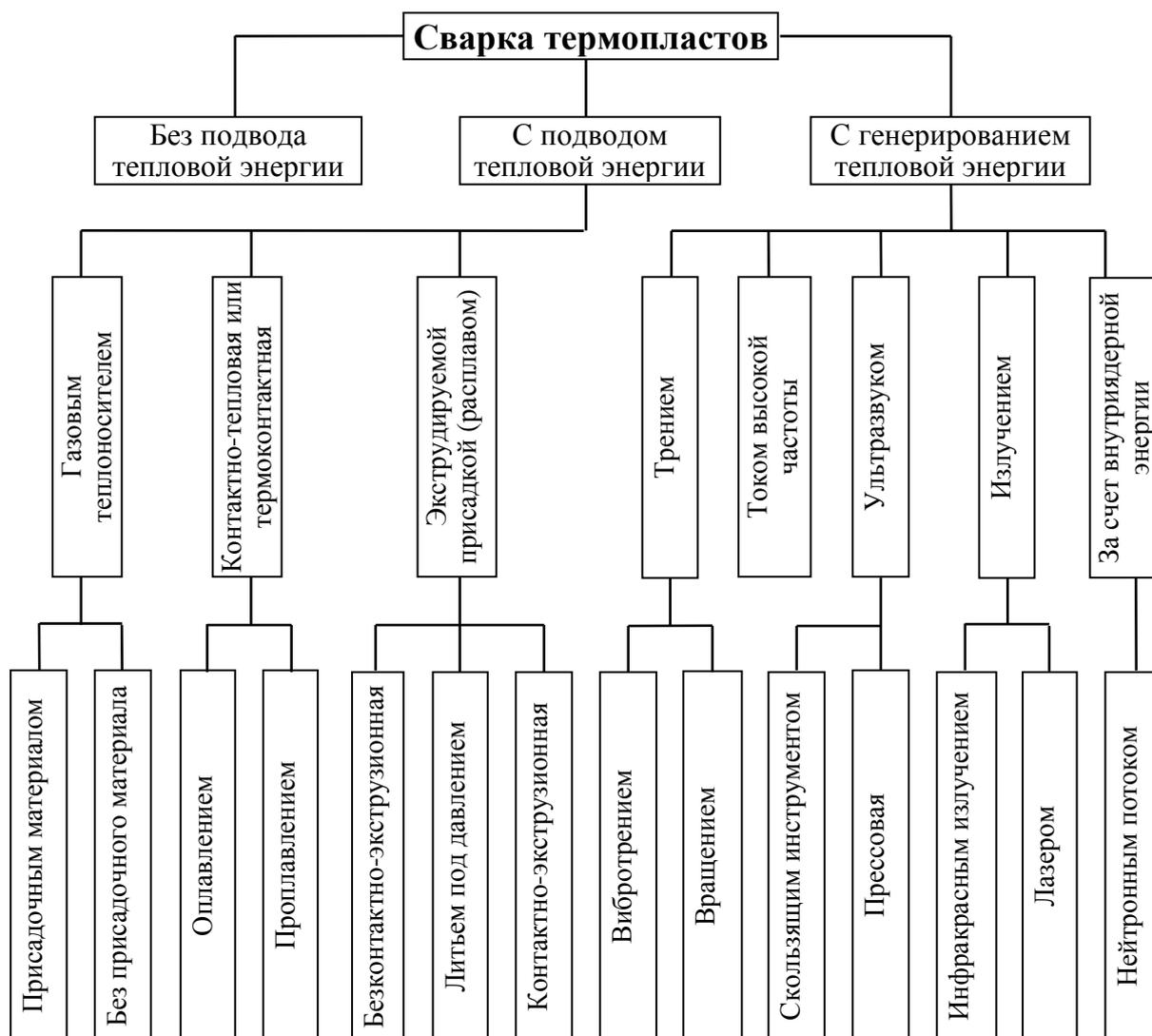


Рис. 21.1. Классификация способов сварки пластмасс

Для повышения производительности применяют сдвоенный сварочный пруток, прутки треугольного или квадратного сечений по площади, близкой площади сечения разделки. Эффективно использовать предварительный нагрев прутка и места разделки. Применяя специальный наконечник горелки, имеющий два сопла (для подачи прутка и горячего воздуха), можно увеличить скорость сварки.

При сварке пластмассовых конструкций газом с присадочным материалом возникают напряжения и деформации в шве и околошовной зоне. Многие технологические приемы их снижения (симметричное поочередное наложение слоев и др.) при дуговой сварке металлов можно эффективно использовать и при сварке пластмасс.

Для сварки нагретым газом с присадочным материалом применяют сварочные горелки, а также горелки с электрическим нагревом газовой струи, например ГЭП-1-67 (рис. 21.2), и нагревом газосгорающими смесями, так называемые горелки косвенного действия типа ГГК-1 и горелки прямого действия типа ГГП-1. Для сварки прямолинейных швов в нижнем положении разработаны сварочные тракторы ПГП-1 и «Пчелка».

Прочность сварных соединений винипласта, выполненных газовым теплоносителем с присадочным материалом, составляет 0,4 – 0,6 от прочности основного материала, 0,3 – 0,4 для полиметилметакрилата, 0,4 – 0,5 для полистирола.

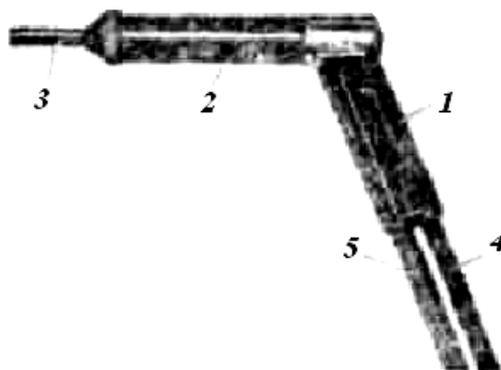


Рис. 21.2. Горелка для сварки пластмасс с электрическим нагревом газового теплоносителя: 1 – рукоятка; 2 – корпус с нагревателем; 3 – сменное сопло; 4 – токоподводящий кабель; 5 – воздухопровод

2. Контактную сварку или сварку нагретым инструментом подразделяют на *сварку оплавлением* и *сварку проплавлением*.

В первом случае нагреватель соприкасается непосредственно со свариваемыми поверхностями, **во втором случае** тепло к свариваемым поверхностям поступает сквозь толщу деталей, а нагретый инструмент контактирует с поверхностью свариваемых деталей. Первый способ используют для сварки деталей значительной толщины, второй способ – для сварки тонких листов и пленок внахлестку. При этом используют различные схемы нагрева свариваемых деталей (рис. 21.3).

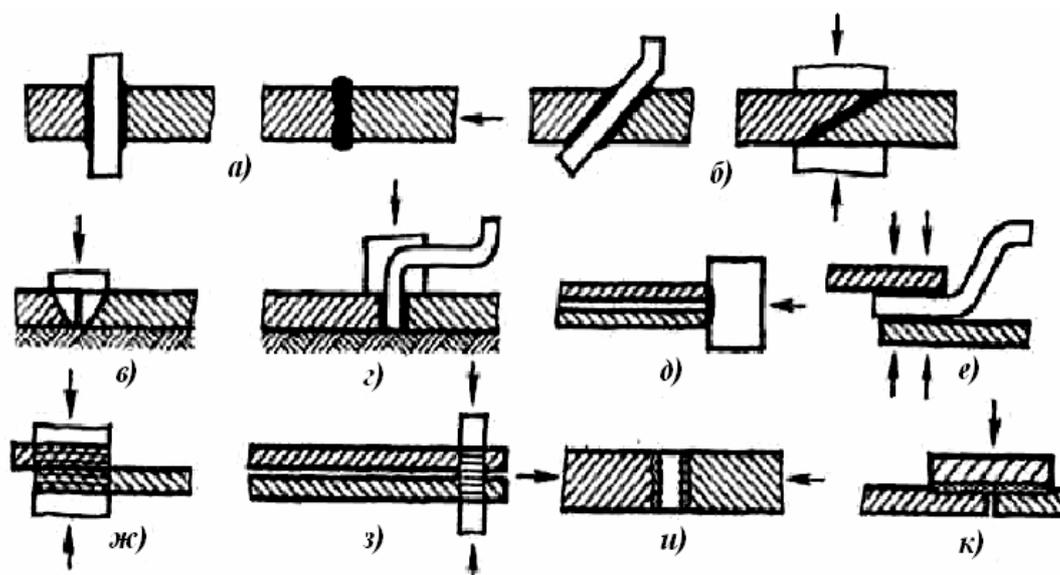


Рис. 21.3. Основные схемы контактной сварки: *a – e* – оплавлением; *ж* и *з* – проплавлением; *и* и *к* – закладным нагревательным элементом

Нагретые инструменты могут быть в виде пластин, полос, дисков, нитей и профилированных планок. Режим сварки некоторых термопластов приведен в табл. 21.2.

Таблица 21.2

Основные параметры режима контактной сварки пластмасс оплавлением

Термопласт	Температура нагрева инструмента, °C	Давление, кгс/см ²		Время нагрева, с
		нагрева (начальное)	осадки	
Полиэтилен:				
ВП	240 ±10	0,2-0,5	1,5-3,0	30-180
НП	190-220	0,3-0,4	1,5-2,0	30-80
Винипласт	230-250	3,0-4,0	5,0-9,0	40-60
Пластифицированный ПВХ	180-200	0,1-0,3	1,0-1,5	20-60
Полипропилен	190-240	0,3-0,4	1,5-2,0	30-120
Поливинилацеталь	220	0,1-0,2	~1	10-40

Указанное в таблице давление нагретого инструмента является начальным, и по мере оплавления неровностей на кромках свариваемого материала оно должно снижаться, чтобы уменьшить вытекающий из зоны контакта расплав. После нагрева и осадки охлаждение по всей свариваемой площади должно происходить равномерно, под постоянным давлением.

Трубы диаметром более 50 мм соединяют встык, трубы диаметром менее 50 мм при толщине стенки менее 2 мм сваривают внахлест. При стыковой сварке торцы труб нагревают плоским инструментом, имеющим форму диска для нагрева труб малого диаметра и форму кольца для нагрева труб большого диаметра. Нагрев этих инструментов в зависимости от конструкции можно осуществлять встроенными электронагревателями либо газовыми горелками.

При сварке винипласта применяют нагретые инструменты, имеющие ребристую поверхность; высота и шаг пилообразных ребер 0,5 – 1,5 мм.

Производительность трубосварочных установок при сварке труб диаметром 100 – 200 мм пять-семь стыков в час.

При сварке вращающихся труб нагревательный инструмент имеет гильзу для оплавления конца трубы и дорн для оплавления внутренней поверхности раструба.

При использовании закладного нагревателя нагрев и оплавление в зоне контакта собранных полностью деталей производится при пропускании тока по металлическому проводнику (проволоке, ленте), который закладывается в зону контакта свариваемых деталей при сборке. Усилие в зоне плавления, необходимое для сварки, создается вследствие расширения расплавляемого материала. Например, для сварки закладным нагревателем труб диаметром 25 – 110 мм создано переносное устройство, питающееся от сети переменного тока напряжением 220 В. Потребляемая мощность 750 Вт, ток до 30 А, регулирование рабочего напряжения на закладной спирали 5 – 28 В, время нагрева можно варьировать в диапазоне 20 – 400 с. Размеры установки 450 × 250 × 260 мм при массе 20 кг.

При контактной сварке проплавлением кромки пленок или листов можно нагревать с одной стороны или одновременно с двух сторон. При двустороннем нагреве скорость сварки увеличивают. Пленки и листы толщиной не более 2 – 3 мм сваривают проплавлением с получением нахлесточного соединения. При сварке пленок давление инструмента 5 – 15 кгс/см². Поэтому сварку производят на прессах, снабженных нагревательными элементами сопротивления – стальными лентами, нитями либо плитами с встроенными тенями (трубчатыми теплоэлектронагревательными элементами). Равномерное давление по длине рабочей части нагревателя обеспечивается применением эластичных и упругих подкладок, располагаемых под нагревателем.

Для непрерывной сварки неармированных пленок можно применять роликовые инструменты, которые используют при ручной сварке. Для полуавтоматической сварки созданы сварочные полуавтоматы ленточного типа. Между непрерывно перемещающимися навстречу друг другу лентами зажимаются и свариваются пленки. В полуавтомате ПСП-15 применен двусторонний контактный нагрев. Две замкнутые металлические ленты, натянутые на четыре ролика и приводимые в движение электродвигателем, перемещают свариваемый материал последовательно между двумя нагревателями и двумя гребенчатыми охладителями. Необходимое давление осуществляют тарированными пружинами. Скорость сварки плавно регулируют в пределах 2 – 5 м/мин.

Для сварки пленок толщиной менее 100 мкм используют *термоимпульсную сварку* – разновидность контактной сварки проплавлением. В этом случае нагревательный элемент, имеющий малую теплоемкость, получает кратковременный импульс тока. Проплавление происходит за счет выделившегося тепла, а охлаждение шва – за счет теплоотвода в подложку или в тело электродержателя. Термоимпульсной сваркой соединяют тонкие пленки из полиолефинов, полиамидов и др.

Армированные пленки сваривают с получением нахлесточного соединения (рис. 21.4).

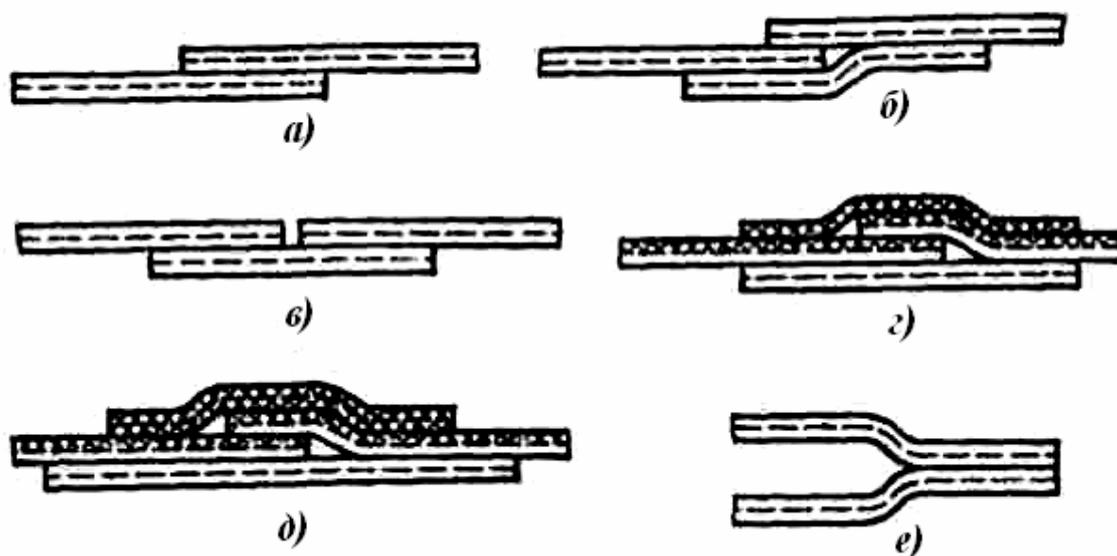


Рис. 21.4. Типы сварных соединений армированных пленок:
 а – нахлесточное; б – д – с накладками; е – рантовое (Т-образное)

Для изготовления сварных оболочковых конструкций из армированных пленок применяют стационарные консольные и порталные сварочные прессы. В качестве нагревателя на этих прессах служат ленты толщиной 0,5 – 0,8 мм из коррозионно-стойкой или жаропрочной стали, располагаемые на гидравлической подушке. Малоинерционные нагревательные элементы позволяют производить сварку практически с любым термическим циклом, от импульсного – при сварке пленок малых толщин, до длительного – при сварке толстых и резино-наполненных пленок. Для сварки пленок в монтажных условиях применяют переписные прессы (струбцины).

Сварку коротких швов единичных изделий можно выполнять ручными клещами, позволяющими получать за цикл шов длиной 100 – 200 мм.

3. Сварку экструдированной присадкой производят при непрерывной подаче расплавленного присадочного материала между соединяемыми поверхностями. Ее можно выполнять по трем схемам.

При сварке открытой струей присадочный материал непрерывно поступает в зону соединения из сопла экструдера, находящегося на некотором расстоянии.

При контактно-экструзионной сварке нагретое сопло может касаться свариваемых кромок, добавочно нагревая их.

В третьем случае расплав подается в зону соединения из литейной машины периодически. Таким способом соединяют заранее отштампованные скорлупы и сварку их производят в собранном виде, в форме, которая имеет специальные каналы, расположенные вдоль линии разъема. По этим каналам продавливается расплав. При передаче части тепла расплава детали плавятся и соединяются по линии разъема. Этот способ сварки целесообразно использовать для соединения пластмасс, имеющих сравнительно невысокую температуру перехода в вязкотекучее состояние (полиэтилен, полипропилен, пластифицированный поливинилхлорид, полистирол и др.).

В первых двух случаях экструдированной присадкой можно получать стыковое, нахлесточное и угловое соединения. При стыковой сварке можно применять V-образную и X-образную разделки. При сварке полиолефинов угол раскрытия кромок следует выдерживать 70 – 100° при V-образной разделке, 60 – 80° при X-образной разделке. Зазор должен быть 0,5 – 1,5 мм. Температура присадочного материала 220 – 280 °С. Диаметр струи расплава 3 – 4 мм.

Прочность сварного соединения увеличивается при сопутствующей прикатке формируемого шва роликом. Давление ролика в этом случае должно быть 1 – 3 кгс/см.

Для экструзионной сварки применяют полуавтомат ПСП-5. Он имеет ручной пистолет массой 1,5 кг, подсоединенный к переносному пульту электрическим кабелем. Пистолет работает по принципу выдавливания плавящегося конца присадочного прутка, непрерывно толкаемого холодной частью прутка. Пистолет нагревается электроспиралью. К корпусу пистолета прикреплена катушка с присадочным прутком, который подается с помощью роликов. Ролики приводятся в движение электродвигателем, расположенным в рукоятке пистолета. Производительность полуавтомата ПСП-5 – 0,28 кг/ч.

Для сварки стыков футеровки из полиолефиновых листов толщиной не менее 0,6 мм создано сварочное устройство РЭСУ-500. В комплект РЭСУ-500 входит экструзионный сварочный пистолет прямооточного типа с приспособлением для дополнительного нагрева кромок свариваемых материалов газообразным теплоносителем, пульт управления, электрический кабель и гибкий резиновый шланг для подвода газа – теплоносителя.

В качестве присадочного материала применяют пруток круглого сечения диаметром 4 мм из того же материала, который подвергают сварке. Скорость сварки полиэтиленовых листов толщиной 1,3 – 2 мм составляет 30 – 40 м/ч. Масса пистолета 1,5 кг. Создана полуавтоматическая установка ПЭСУ-2000, в состав которой входит сварочный трактор и пульт управления. В качестве присадочного материала для сварки применяют гранулированный полимерный материал. Скорость сварки листового материала толщиной 1,5 – 2 мм составляет 100 – 120 м/ч.

4. Сварка трением. Различают три схемы процесса сварки пластмасс трением: вращением свариваемых деталей или вставки между ними; вибрацией свариваемых деталей или промежуточного элемента и комбинацией этих двух схем.

Перед **сваркой вращением** массивных деталей соединяемые поверхности должны быть обработаны таким образом, чтобы они имели или сферическую, или коническую форму. Скорость перемещения деталей относительно друг друга зависит от геометрических размеров свариваемых поверхностей и составляет 80 – 200 м/мин. Давление при трении составляет 1 – 15 кгс/см², время от начала контакта до окончания вращения 3 – 25 с. После остановки сваренный стык должен остывать под осевым давлением не менее 5 – 8 мин. При **сварке вибротрением** свариваемым деталям, находящимся в плотном контакте, сообщается относительное возвратно-поступательное движение низкой частоты (50 – 400 Гц) с определенной амплитудой (1 – 2 мм) при давлении 15 – 150 кгс/см². Сваркой трением соединяют термопласты, вязкость которых при температурах перехода в вязкотекучее состояние меняется плавно. Это полиолефины, поливинилхлорид жесткий, полиацетали, акриловое стекло, полистирол и сополимеры стирола.

5. При сварке пластмасс ТВЧ тепловыделение в свариваемой зоне обусловлено в основном током поляризации, возникающим за счет смещения в ограниченных пределах звеньев макромолекул вследствие дипольного эффекта. Поэтому в поле ТВЧ нагревают только полярные пластмассы.

Способность пластмасс к нагреву в поле ТВЧ характеризуется фактором диэлектрических потерь: чем он выше, тем интенсивнее нагрев. Интенсивность теплообразования при высокочастотной сварке может быть повышена увеличением частоты либо напряжения тока. Однако, во избежание пробоя свариваемого пакета, напряжение на конденсаторе не должно превышать 60 – 70 % пробивного напряжения материала. Частота тока определяется характеристикой генератора и физическими характеристиками свариваемого материала. Чем меньше фактор диэлектрических потерь пластмассы, тем выше должна быть частота тока.

При сварке пленок для уменьшения интенсивности теплоотвода в электроды применяют прокладки из термоизоляционного материала, например, прессшпана. Продолжительность сварки зависит от длины свариваемого шва и толщины пакета. При толщине пленки из пластифицированного ПВХ 0,1; 0,3; 1,0 мм площадь шва 20, 25 и 50 см²; на их сварку необходимо 3 – 12 с; давление 1 – 5 кгс/см³. Сварку пленки совмещают с обрезкой готовых деталей. Для этой цели применяют электроды, имеющие режущую кромку специальной формы.

Поперечные стыки труб из винипласта при толщине стенок не более 6 – 8 мм сваривают с помощью ТВЧ на частотах 40 – 75 МГц путем нагрева кольцевыми индукторами. При сварке ТВЧ материалов из полиамидов термомеханический режим необходимо выдерживать в узких пределах. Интервал вязкотекучего состояния полиамидов 3 – 5 °С. Расширение температурного диапазона сварки достигается добавкой в зону шва пластификатора, например трикрезола.

Для сварки ТВЧ в стационарных условиях используют прессы с ручным пневматическим или гидравлическим приводом. Устройства для сварки ТВЧ обеспечивают работу с ограничителем по зазору между электродами к концу цикла сварки либо постоянное давление на протяжении всего цикла. Имеются сварочные машины, у которых давление изменяется по определенной программе в зависимости от термического цикла.

Область применения высокочастотной сварки можно расширить путем повышения частоты электрического поля до сверхвысоких частот (СВЧ около 2000 – 3000 МГц). С помощью СВЧ можно сваривать пленки из фторопластов Ф-2М, Ф-3Б, Ф-30, Ф-40, Ф-40ЛД, Ф-42, Ф-4НА.

Сварочные установки для сварки СВЧ имеют генератор на основе магнетронов (например, М-57) мощностью 2,5 – 5 кВт и сварочное устройство. Протяжной механизм устройства служит для перемещения свариваемой пленки со скоростью 0,3 – 0,8 м/мин. Два электрода устройства расположены на станине. Один из электродов является плитой на регулируемых пружинах, обеспечивающих сварочное давление, а второй – штоком, подключаемым к волноводу от генератора. Сварку ведут с антиадгезионными прокладками. Механические характеристики сварных швов, выполненных СВЧ, приведены в табл. 25.

6. Сварку пластмасс ультразвуком (УЗ) производят на частотах 20 – 50 кГц.

Для большинства пластмасс оптимальная амплитуда смещения конца волновода 30 – 40 мкм. С помощью давления волновода на свариваемые детали обеспечивается не только акустический контакт, но и формирование сварного соединения. Время сварки (время пропускания ультразвука)

также влияет на прочность сварных соединений. КПД ультразвуковой установки повышается, если к магнитостриктору подсоединяют два трансформатора с волноводами.

Различают три группы пластмасс, каждую из которых характеризует коэффициент затухания УЗ-колебаний.

К первой группе относятся пластмассы с малым коэффициентом затухания $\beta = 0,35 \text{ см}^{-1}$ – полистирол, оргстекло, сополимеры СНП, СН-28 и др., т. е. пластмассы, обладающие высокой жесткостью ($E > 3 \cdot 10^4 \text{ кгс/см}^2$) и хорошо проводящие ультразвуковые волны, вследствие чего сварные соединения могут образовываться вдали от волновода.

Ко второй группе относятся полужесткие термопласты ($2 \cdot 10^4 \text{ кгс/см}^2 < E < 3 \cdot 10^4 \text{ кгс/см}^2$) – полипропилен, полиэтилентерефталат, аминопласты, поликарбонаты и другие, коэффициент затухания у которых $0,35 \text{ см}^{-1} < \beta < 0,55 \text{ см}^{-1}$.

К третьей группе относятся мягкие пластмассы ($E < 1,5 \cdot 10^4 \text{ кгс/см}^2$), коэффициент затухания которых $\beta > 0,55 \text{ см}^{-1}$. Это полиэтилен высокой и низкой плотности, поликапроамид (капрон), фторопласт, пластифицированный поливинилхлорид и др. Последние в значительной степени рассеивают УЗ-энергию, поэтому их можно сваривать в виде листов и пленок толщиной не более 1 – 2 мм. Мягкие термопласты можно сваривать только прессовым методом. С помощью контактной прессовой УЗ-сварки получают точечные, прямолинейные и замкнутые швы различного контура в зависимости от конфигурации волновода. Оптимальный диаметр точки 10 мм, а длина прямолинейных швов, полученных за один шаг, 240 мм. Максимальный периметр, в случае квадратного или фигурного электрода, – 200 – 340 мм. При сварке деталей из пленки и синтетических тканей можно получать непрерывные швы за счет перемещения волновода или свариваемой детали. При сварке пленок повышенной толщины, во избежание продавливания пленки, сварку ведут с фиксированным зазором.

Оптимальный режим УЗ-сварки жестких термопластов (полистирола, полиметилметакрилата и др.): амплитуда смещения конца волновода 25 – 30 мкм; сила прижатия 15 – 20 кгс; продолжительность сварки 2 с. Прочность при УЗ-сварке во многих случаях выше, чем при термоимпульсной.

7. Сварку излучением производят путем нагрева соединяемых кромок инфракрасными (ИК) лучами или лучом лазера.

В качестве источника ИК-излучения при сварке термопластов используют либо трубчатые кварцевые лампы, либо металлические и неметаллические инструменты. Преимуществом этого способа сварки является бесконтактный нагрев свариваемых деталей, что позволяет избежать значительных деформаций и не требует применения антиадгезионных прокладок.

Поглощение лучистой энергии термопластами зависит от физических свойств наполнителя, пластификатора и других факторов. По способности поглощения лучистой энергии термопласты можно расположить в следующем порядке: фторопласт, полиэтилен, полипропилен, поливинилхлорид, полиамид.

Для сварки пленок ИК-излучением созданы отечественные установки (МСП-5у и др.). На машине МСП-5у (сварочная головка которой имеет силитовый стержень длиной 250 мм) при сварке пленок толщиной 45 – 60 мкм скорость около 3 – 4 м/мин, а при сварке пакета толщиной 2 – 2,5 мм скорость 0,5 м/мин. Для пленок из полиолефинов толщиной 45 – 60 мкм время сварки 2 – 4 с, а для пленок толщиной 2 – 2,5 мм время сварки 20 – 30 с. При толщине пленки 60 мкм из фторопласта-3 время сварки 10 – 12 с.

8. Сварку лазером пластмасс производят с помощью молекулярных лазеров мощностью более 1 кВт при КПД 15 – 20 %.

Этот вид сварки эффективно используют для соединения пленок с высокими скоростями. Пленки из полиолефинов толщиной 50 – 150 мкм сваривают СО₂-лазером со скоростью 33 – 67 м/с. Пленки из ПВХ лазером свариваются плохо вследствие деструкции поверхностных слоев в фокусе луча. При шовной сварке лазерная установка неподвижна, а пленка непрерывно перемещается таким образом, чтобы луч был направлен в зону контакта.

9. Нейтронная сварка заключается в облучении зоны сварного шва локальным потоком нейтронов.

На свариваемые поверхности пластмассовых деталей предварительно наносят тонкий слой соединений лития или бора. Детали собирают под давлением и облучают нейтронным лучом. При этом в зоне контакта происходят ядерные реакции с выделением тепла. Вследствие этих реакций происходят не только диффузионные процессы, но и рекомбинация химических связей по границе контакта, ведущая к образованию неразъемного соединения. Этот способ применим для сварки пластмасс с низкой вязкостью при повышенных температурах, например для сварки фторопласта-4 или разнородных материалов (керамики, кварца, алюминия, меди с фторопластом-4).

10. В промышленности находит также применение **сварка без нагрева**. Взаимное течение и перемешивание материала в зоне контакта свариваемых пластмассовых деталей обеспечивается при соответствующей схеме приложений нагрузок без специального подвода тепла в зону контакта. Этим способом можно сваривать лишь термопласты, обладающие повышенной пластичностью при температуре окружающей среды, например – пластифицированные поливинилхлориды. Основным типом соединений в этом случае является нахлесточное. Перед сваркой не более чем за 10 –

30 мин с поверхностей деталей в зоне шва строганием удаляют слой пластмассы (окисленный и загрязненный) толщиной 100 – 200 мкм. К собранным деталям прикладывается большое давление, обеспечивающее течение пластмассы в зоне контакта. В зависимости от вязкости материала давление составляет 25 – 80 кгс/см². Для уменьшения вязкости в зону контакта вводят растворители или присадочный материал того же типа, но содержащий большое количество пластификатора.

Контрольные вопросы

1. На чем основывается сварка пластмасс? Какие существуют два типа молекулярного взаимодействия при сварке?
2. Какие существуют способы сварки пластмасс?
3. Приведите основные способы сварки пластмасс и дайте им краткую характеристику.
4. Назовите области применения сварки пластмасс.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Холодная сварка металлов

Цель работы – изучить физическую сущность процесса, ознакомиться с работой типового оборудования, получить практическое представление о технологических возможностях холодной сварки.

Физическая сущность процесса

Холодная сварка относится к способам сварки давлением при значительной пластической деформации соединяемых материалов заготовок в зоне их контакта без нагрева свариваемых частей внешними источниками тепла.

В реальных условиях все металлические поверхности имеют неровности и покрыты оксидными пленками. При холодной сварке соединяемые поверхности зачищают от жировых и оксидных пленок, заготовки помещают в специальные зажимные устройства и к ним прикладывают давление с целью осуществления пластического деформирования свариваемых поверхностей. В процессе пластического деформирования поверхности заготовок сближают на расстояния, соизмеримые с параметрами кристаллической решетки, возникают межатомные и межмолекулярные силы взаимодействия и образуются металлические связи.

Формирование сварного соединения при холодной сварке осуществляется в три этапа:

1) образование физического контакта (при этом происходит разрушение оставшихся пленок оксидов, возникает контакт соединяемых поверхностей заготовок в отдельных, наиболее выступающих, местах из зоны соединения, сглаживание поверхностных микронеровностей);

2) активация контактных поверхностей (возникновение активных центров в месте контакта);

3) объемное взаимодействие (образование зон схватывания на активных центрах).

Холодной сваркой соединяют листовые заготовки и стержни. Листовые заготовки, имеющие хорошую пластичность, соединяют внахлестку путем вдавливания пуансона 7 (рис. 1.1, а и б) в заготовки 3, предварительно зажатые прижимами 2 или не зажатые. Соединение стержней встык осуществляют с помощью специальных зажимных приспособлений (рис. 1.1, в).

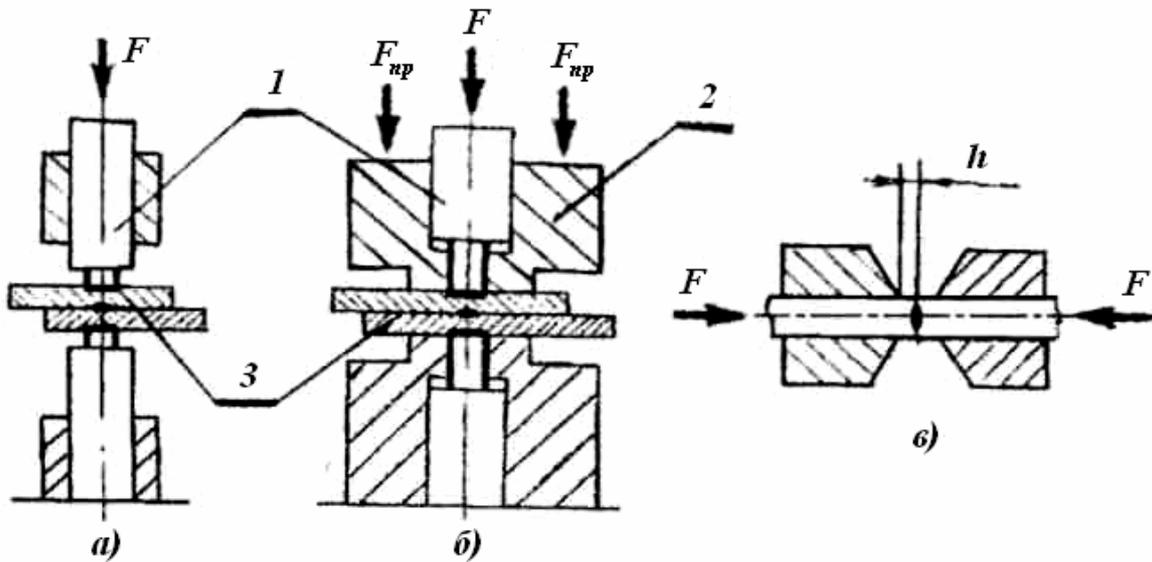


Рис. 1.1. Схема холодной сварки:

a — не зажатых заготовок; *б* — предварительно зажатых; *в* — стержней;
 1 — пуансон; 2 — прижим; 3 — заготовки

Чтобы получить качественные соединения в месте сварки, металл подвергают значительной пластической деформации для удаления жировых и оксидных пленок из зоны контакта, снятия шероховатостей поверхности.

Степень относительной деформации ε_{\min} при сварке внахлестку листовых заготовок определяется отношением глубины вдавливания пуансона h , мм, к толщине заготовки δ , мм:

$$\varepsilon_{\min} = \frac{h}{\delta} \cdot 100\% \quad (1.1)$$

В табл. 1.1 приведены значения ε_{\min} для различных материалов.

Таблица 1.1

Материал	ε_{\min} , %	Материал	ε_{\min} , %
Медь	90	Свинец	55
Олово	84	Серебро	50
Алюминий	70	Золото	35

Холодную сварку выполняют на воздухе без нагрева заготовок при комнатной температуре. Холодная сварка возможна даже при температуре ниже 0°C .

Сварка внахлестку

Этим способом соединяют листы толщиной от 0,2 до 1,5 мм в отдельных точках или непрерывным швом.

При точечной сварке заготовки помещают между соосно расположенными пуансонами, состоящими из рабочего выступа круглого или

прямоугольного сечения и опорной части (см. рис. 1.1, а и б). Диаметр или ширина выступа равны двум-трем толщинам свариваемых заготовок. Рабочие выступы вдавливаются в местах соединения заготовок, вызывая местную пластическую деформацию металла. Давление пуансона при сварке алюминия составляет 300... 600 МПа, для меди – до 2000 МПа.

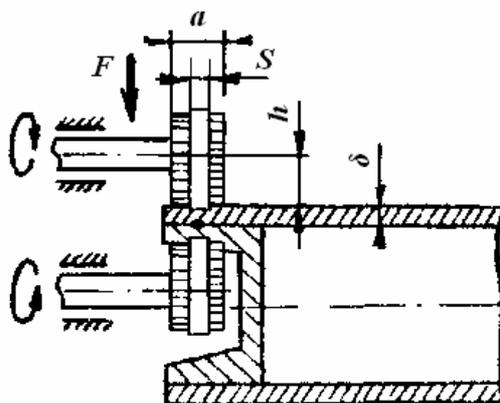


Рис. 1.2. Схема сварки кольцевым замкнутым швом

При сварке непрерывным швом деформирование и сваривание металла осуществляется за счет вдавливания в него рабочих выступов вращающихся роликов. На рис. 1.2 представлена схема сварки кольцевым замкнутым швом доньшка с цельнотянутым корпусом.

Сварка изделий встык

Этим способом соединяют заготовки (см. рис. 1.1, в), сечение которых составляет от 2 до 100 мм. При стыковой сварке заготовки помещают в зажимы и к ним прикладывают давление. Основными параметрами, определяющими прочность и надежность сварного соединения, являются давление на заготовки и вылет заготовки (расстояние от зажима до места контакта свариваемых заготовок). При сварке алюминиевых проводов вылет составляет 1... 1,2 d_3 , где d_3 – диаметр заготовки, а при сварке медных – 1,25... 1,75 d_3 . Приложение давления к заготовкам приводит к пластической деформации, которая необходима при холодной сварке. Давление на заготовки при сварке алюминия с медью достигает 1500... 2000 МПа.

Холодную сварку применяют в производстве изделий домашнего обихода из алюминия и его сплавов (чайники, подставки, различного рода каркасы и т. д.), в электротехнической промышленности и транспортном машиностроении – для соединения алюминиевых и медных проводов диаметром от 1,5 до 10 мм, а также алюминиевых проводов с медными наконечниками, медно-алюминиевых шинных контактов, корпусов полупроводниковых приборов.

Сварочное оборудование

Холодную сварку осуществляют на специальных машинах, состоящих из корпуса, механизма давления, штампа и специальных губок, которые служат для предварительного зажатия заготовок перед сваркой. По степени механизации основных и вспомогательных операций машины подразделяют на неавтоматизированные с ручным управлением, полуавтоматы и автоматы. Установка для холодной сварки может быть переносной или стационарной.

Установка состоит из корпуса, механизма давления, специальных сварочных губок-зажимов, которые служат для предварительного закрепления заготовок перед сваркой. Механизм давления – пневматический. Управление работой пневмоцилиндра осуществляется трехходовым краном. Пневмоцилиндр соединен с компрессором. Машина снабжена специальным ножом, работающим от пневмопривода для обрезки и зачистки заготовок.

Порядок выполнения работы

1. Изучить физическую сущность процесса.
2. Ознакомиться с конструкцией и принципом работы машины для холодной сварки.
3. Подготовить торцовые поверхности свариваемых проволок с помощью специального ножа, установленного на машине.
4. Установить алюминиевые заготовки в зажимах машины так, чтобы их вылет составлял $h = (1 \dots 1,2) d_3$, где d_3 – диаметр заготовки, мм.
5. На манометре установить значение давления равным 1 кгс/см².
6. Последовательно изменяя давление домкратом (2... 4 кгс/см), осуществить сварку.
7. Определить степень оптимальной деформации стыковых соединений по формуле:

$$\varepsilon = \frac{2h - H}{2h} \cdot 100\% \quad (1.2)$$

где H – расстояние между зажимами после сварки, мм.

8. Определить качество сварных соединений по углу изгиба.
9. Установить вылет заготовок $h = 0,5 d_3$ и повторить п.п. 4 – 8.
10. Занести полученные данные в табл. 1.2

Таблица 1.2

Материал заготовок	d_3 , мм	h , мм	Давление, МПа	ε , %	Качество соединения

11. Зарисовать эскиз сварного соединения.
12. Оформить отчет о работе.

Содержание отчета

Отчет о работе должен включать в себя:

1. Описание физической сущности, схемы процесса холодной сварки.
2. Характеристики свариваемых материалов.
3. Перечисление технологических возможностей холодной сварки.
4. Таблицу с исходными данными и результатами контрольной сварки.

Контрольные вопросы

1. Что является основным условием получения качественного сварного соединения при холодной сварке?
2. С какой целью при холодной сварке применяют высокие значения давления на заготовки?
3. Какие металлы и сплавы можно сваривать холодной сваркой?
4. Укажите основные параметры режима холодной сварки.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Лазерная сварка металлов

Цель работы — получить практические представления о лазерной сварке, основных характеристиках лазерного излучения. Изучить физическую сущность процессов. Ознакомиться с устройством типового оборудования. Провести опытную сварку заготовок, определить технологические возможности процесса.

Физическая сущность лазерного излучения

Лазерное излучение (ЛИ) – это вынужденное монохроматическое излучение, длина волны которого зависит от природы рабочего тела лазера – излучателя и может составлять 0,1... 1000 мкм. Наиболее часто используемые в технологической практике лазеры характеризуются следующими длинами волн излучения: гелий-неоновый – $\lambda = 0,6328$ мкм; рубиновый – $\lambda = 0,6943$ мкм; стекло с неодимом – $\lambda = 1,06$ мкм; CO₂-лазеры – $\lambda = 10,6$ мкм. Чем меньше длина волны лазерного излучения, тем больше его способность проходить через вещество.

Лазерное излучение возникает в результате вынужденных скачкообразных переходов энергии возбужденных атомов рабочего тела лазера на более низкие энергетические уровни. При таком переходе возбужденный атом отдает энергию в виде фотона с частотой ν , свойственной материалу применяемого рабочего тела. Испускание света можно инициировать воздействием внешнего фотона, обладающего энергией, соответствующей разнице энергий между возбужденным и начальным состояниями атома. В результате такого взаимодействия генерируются два фотона с одинаковой частотой, которые распространяются в направлении фотона-инициатора. Для получения заметной генерации вынужденного излучения необходимо добиться такого состояния рабочих тел, при котором преобладали бы переходы с возникновением новых фотонов. Это состояние искусственно достигается при воздействии различных источников энергии: световой, тлеющим электрическим разрядом, энергией химических процессов, т. е. осуществляется так называемая «накачка» рабочих тел лазера.

В твердотельных лазерах (рубин, стекло с неодимом) накачка проводится фотонами специальных источников излучения 3, направленных на рабочее тело 2 отражателем 4 (рис. 2.1 а, б). Для лучшей генерации излучения и его направленности рабочее тело лазера помещают между точно установленными

зеркалами-резонаторами 1, одно из которых в целях вывода излучения сделано полупрозрачным. Вышедшее из лазера излучение фокусируется на обрабатываемом изделии 6 специальной линзой 5. В отличие от обычных световых волн лазерная волна обладает значительно большей степенью «упорядоченности», так как в лазере фотоны излучаются атомами одного вещества рабочего тела под действием однонаправленных импульсов-возбудителей. Поэтому степень когерентности лазерного излучения, характеризуемая идентичностью состояния фотонов, их энергий, направлением поляризации, на несколько порядков больше обычного светового луча (рис. 2.1 в, г).

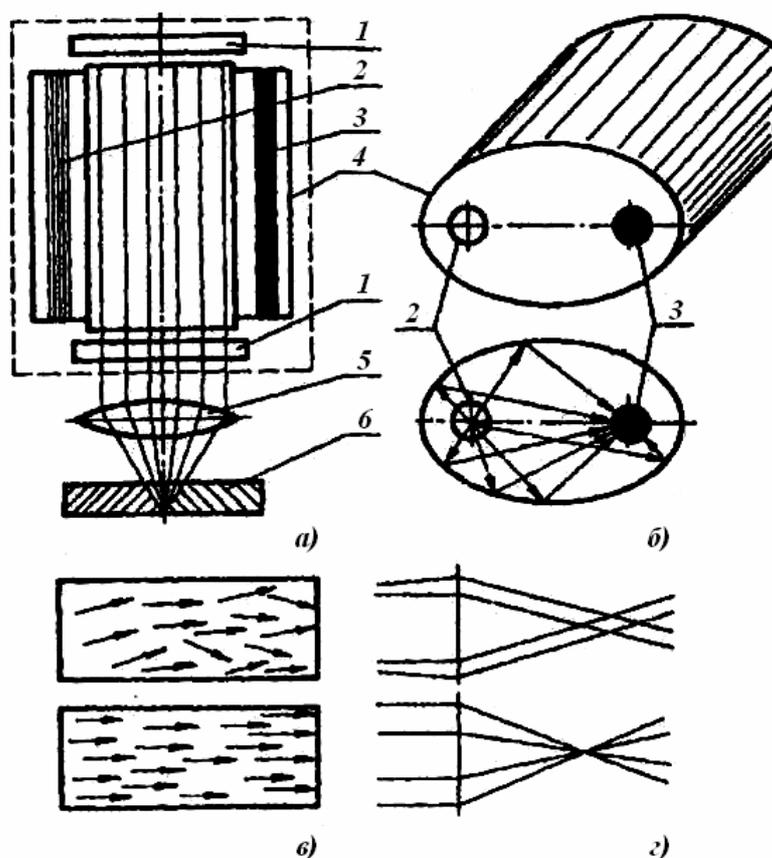


Рис. 2.1 Схема работы твердотельного лазера:

1 – зеркала резонаторы; 2 – рабочее тело; 3 – источник излучения;
4 – отражатель; 5 – фокусирующая линза; 6 – обрабатываемое изделие

В зависимости от степени когерентности лазерный луч может быть сфокусирован в пятно с размерами от десятых долей миллиметра до нескольких десятков микрон, что позволяет получить плотность, мощности излучения в фокальной плоскости свыше 10^8 Вт/см².

Твердотельные лазеры могут функционировать в непрерывном или импульсном режиме. Мощность таких лазеров, работающих в непрерывном режиме, обычно не превышает 250... 300 Вт.

Твердотельные лазеры, работающие в импульсном или импульсно-периодическом режиме, могут иметь энергию разряда 100 Дж и более, что обеспечивает плотность мощности излучения в сфокусированном пятне свыше 10^8 Вт/см².

Для получения непрерывного излучения большой мощности (5, 10 кВт и более) применяют газовые лазеры. Рабочим телом у них чаще всего является газ СО₂, который в смеси с азотом и гелием с помощью специальных насосов прокачивается через разрядную камеру с тлеющим электрическим разрядом. В камере происходит возбуждение молекул газа. Энергия возбужденных частиц СО₂ в резонаторной камере переходит в световой поток большой мощности, который выводится наружу, фокусируется и направляется на обрабатываемую поверхность материала.

Сущность лазерной обработки материалов

Лазерное излучение при встрече с препятствием (обрабатываемым материалом) частично отражается от его поверхности и теряется в атмосфере, частично поглощается с выделением некоторого количества теплоты. Для увеличения доли полезно используемой энергии лазерного луча необходимо повышать коэффициент поглощения поверхности. Для этого иногда поверхность материалов, у которых отражательная способность велика (А1, Си, Аg и др.), перед началом лазерной обработки покрывают специальными «зачерняющими» материалами.

На рис. 2.2 представлена упрощенная температурная диаграмма тепловой эффективности воздействия ЛИ, т. е. зависимость коэффициента поглощения $A_{эф}$ от плотности мощности излучения. Там же представлены диапазоны плотностей мощности для различных видов лазерной обработки: термообработки 1, сварки 2, резки 3, пробивки отверстий 4, металлообработки 5 и других способов 6. Эффект воздействия ЛИ на материал зависит от времени воздействия луча и от плотности мощности.

Большая плотность мощности, достигаемая в остросфокусированном лазерном луче (значительно выше, чем в сварочной дуге, и на порядок выше, чем в электронном пучке), позволяет получать особые эффекты при обработке материалов. Например, можно достичь скоростей нагрева в несколько десятков и даже сотен тысяч градусов в секунду. Металл в этих условиях может интенсивно испаряться. Такие режимы используют для прошивки отверстий или при резке.

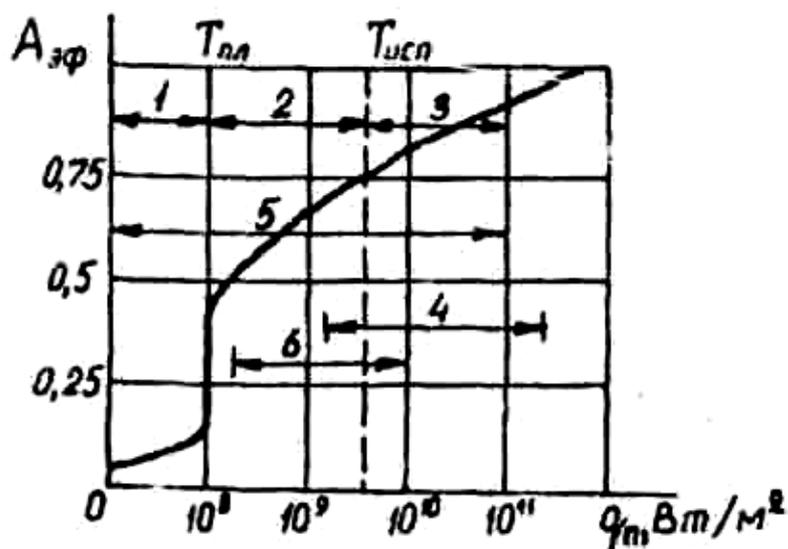


Рис. 2.2 Температурная диаграмма тепловой эффективности лазерного излучения

Интенсивный сосредоточенный нагрев обычно приводит и к чрезвычайно большой скорости охлаждения жидкого металла после прекращения воздействия луча. Можно создать условия охлаждения, при которых обрабатываемый материал после расплавления охлаждается так быстро, что процессы кристаллизации с образованием упорядоченной структуры не успевают проходить, при затвердевании в этих условиях образуется аморфный слой, обладающий специфическими свойствами. В то же время, расфокусированный луч может быть и очень «мягким», что позволяет его использовать в качестве универсального источника нагрева для термообработки, наплавки, пайки, сварки, резки и т. п.

Основные параметры режимов лазерной обработки; мощность излучения P , диаметр пятна фокусировки $d_{тв}$, скорость V перемещения обрабатываемого материала относительно луча.

Сущность процесса лазерной сварки заключается в расплавлении лучом свариваемых кромок заготовок, собранных с минимальными зазорами (0... 0,2 мм), и в последующей кристаллизации. Достоинствами лазерной сварки являются: возможность вести процесс на больших скоростях – до 500 м/ч, узкий «ниточный» шов, чрезвычайно малая зона термического влияния, практически отсутствие деформаций изделия после сварки.

Процессы лазерной обработки легко поддаются автоматизации, и поэтому часто установки оснащаются комплексными системами с ЧПУ.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с принципами работы и конструкцией лазерной установки Квант-16, а также с технологической оснасткой для лазерной сварки.
2. Выбрать технологические режимы сварки.
3. Осуществить сварку опытных образцов.
4. Произвести испытание образцов на разрывной машине.
5. Занести полученные данные в табл. 2.1

Таблица 2.1

Материал заготовок	Толщина заготовок, мм	Диаметр пятна фокусировки $d_{п}$, мм	Скорость перемещения V , мм/с	Мощность излучения P , Дж	Прочность соединения на разрыв, МПа

Содержание отчета

1. Описание физической сущности лазерного излучения и схемы процесса.
2. Характеристика используемых в практике лазеров.
3. Таблица с исходными данными и результатами контрольной сварки.

Контрольные вопросы

1. Какие основные характеристики лазерного излучения определяют технологические возможности лазерной обработки – глубину проплавления, скорость сварки, толщину свариваемого изделия?
2. В чем состоит основное различие твердотельных и газовых лазеров?
3. В чем заключаются основные особенности применения лазера от других высококонцентрированных источников энергии применяемых для сварки?
4. Назовите области применения лазерного излучения в технологии.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Светолучевая сварка с использованием установки УСС-1

Цель работы – получить практические представления о сварке световым лучом. Изучить физическую сущность процесса. Ознакомиться с устройством типового оборудования. Произвести опытную сварку заготовок, определить технологические возможности процесса.

Физическая сущность сварки световым лучом

Сварка и пайка световым лучом заключается в применении сфокусированной лучистой энергии различных источников, излучающих в оптическом диапазоне частот.

Нагрев лучистой энергией обладает некоторыми преимуществами по сравнению с другими способами, а именно возможность термической обработки материалов независимо от их электрических и магнитных свойств; бесконтактным подводом энергии к изделию (причем источник и нагреваемый объект могут располагаться на значительном расстоянии друг от друга); незначительным механическим воздействием на зону нагрева; возможностью передачи энергии через оптически прозрачные оболочки, что позволяет проводить процессы сварки и пайки в контролируемой газовой атмосфере и в вакууме.

В установках для сварки и пайки световым лучом можно использовать такие источники излучения, как Солнце, угольная дуга, дуговые газоразрядные лампы и лампы накаливания.

Наиболее перспективным и удобным излучателем для технологических целей являются дуговые неоновые лампы сверхвысокого давления.

Отечественная промышленность серийно выпускает дуговые неоновые лампы следующих типов: с воздушным охлаждением ДКСШ-500 (0,5 кВт), ДКСШ-100М (1 кВт) и ДКСШ-3000 (3 кВт); с комбинированным водяным и воздушным охлаждением ДКСР-3000 (3 кВт), ДКСР-5000 (5 кВт) и ДКСР-10000 (10 кВт).

Дуговая неоновая лампа представляет собой шаровой баллон из оптически прозрачного кварца с помещенными в него двумя вольфрамовыми электродами. Давление неона в лампе в нерабочем состоянии достигает 10 ат. Электропитание ламп осуществляется от источников постоянного тока с напряжением холостого хода не ниже 70 В и с падающей характеристикой (например, ИПП-500В). Лампы могут работать в непрерывном режиме сотни часов.

Создан ряд специализированных экспериментальных установок для сварки и пайки сфокусированной лучистой энергией неоновых ламп мощностью от 0,5 – 10 кВт. В этих установках излучение неоновой лампы фокусируется на изделие с помощью эллипсоидного отражателя (рис 3.1). С целью увеличения плотности энергии в пятне нагрева может использоваться дополнительная линзовая оптика (рис. 3.1, б).

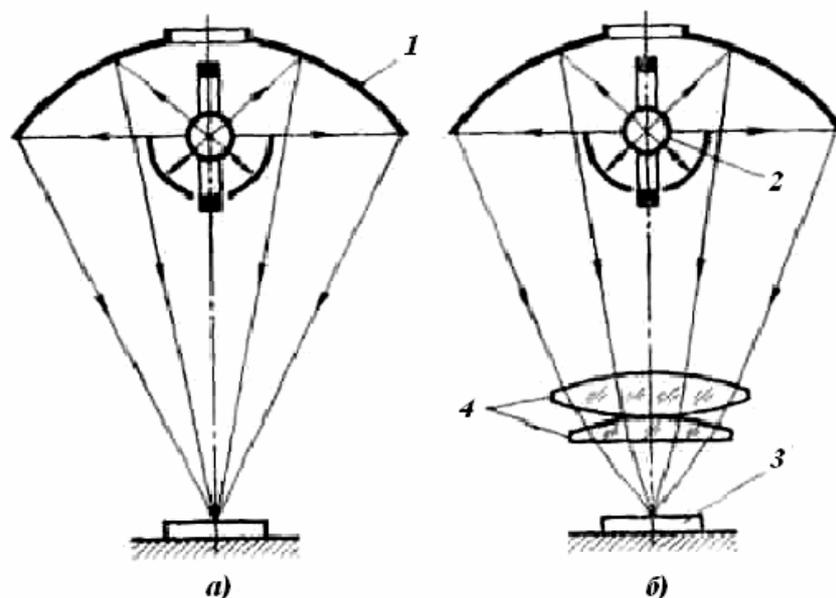


Рис. 3.1 Оптические схемы установок для сварки лучистой энергией:
а – моноэллипсоидная система; *б* – то же, с двухлинзовым конденсором;
1 – отражатель; *2* – лампа; *3* – изделие; *4* – конденсор

Экспериментально установлено, что оптический источник тепла является нормально-круговым и по плотности энергии в пятне нагрева занимает промежуточное положение между газовым пламенем и электрической дугой, а по сосредоточенности близок поверхностным металлическим дугам.

В рабочем пятне установки с неоновой лампой ДКСР-10000 максимальная плотность лучистого потока составляет 2600 Вт/см^2 . Лучистый поток такой плотности достаточен для плавления молибдена. КПД установок составляет 0,1 – 0,2 в зависимости от оптической системы и типа лампы.

Ввиду сравнительно низкой эффективной мощности оптический источник тепла целесообразно использовать для сварки материалов малых толщин.

Исследования по сварке нержавеющей стали и титановых сплавов показали возможность получения качественных соединений на листовом материале толщиной 0,1 – 2 мм. При этом обеспечивается вакуумная плот-

ность и прочность не ниже 90 % от прочности основного материала. Скорость сварки листов толщиной 0,5 мм составляет 10 – 15 м/ч.

Широкие пределы регулирования энергетических параметров позволяют использовать оптический источник для пайки практически любыми из существующих припоев, начиная от оловянно-свинцовых и кончая тугоплавкими на основе никеля и титана.

Оптический источник позволяет сваривать также и неметаллические материалы (стекло, керамику, пластмассу). Успешно осуществлен процесс сварки шлакового стекла, применение которого имеет большое народнохозяйственное значение.

Оптический источник тепла можно использовать также для локальной термической обработки сварных соединений.

Принцип работы светолучевой установки УСС-1

Установка работает следующим образом.

Лучистый поток ксеноновой лампы типа ДКсШРБ собирается в оптическом фокусе системы, оптическая схема представлена на рис. 3.1, а. Регулировка лучистого потока осуществляется изменением тока лампы. Лучистый поток ксеноновой лампы состоит из 9 % ультрафиолета, 35 % составляет видимую область спектра и 56 % инфракрасного излучения, причем 40 % с длиной волны 0,8 – 1 мкм.

Образец, помещенный в фокусе системы, подвергается облучению и прогревается. Скорость нагрева и температура зависят от размеров, формы, материала образца и условий, в которых образец находится.

По мере расплавления образец должен перемещаться вдоль свариваемого шва. Сварка может производиться в струе нейтрального газа или в камере, в вакууме или в газовой среде, при этом ввод лучистого потока должен осуществляться через кварцевое окно.

Скорость сварки и термический режим могут регулироваться изменением режима лампы и фокусировкой.

Аналогично может производиться отжиг материалов и пайка. При необходимости пайка может производиться также через диафрагму или маску.

Подготовка к работе

1. Установить на среднее деление индекс на ползуне излучателя, индекс на опоре – на ноль.
2. Установить мишень на стол под излучатель на соответствующее место, указанное гравировкой.

3. Включить питание на правой тумбе стола, нажатием любой кнопки РЕЖИМ РАБОТЫ на блоке управления и убедиться, что лампа пробивается поджигом. При необходимости подрегулировать зазор разрядника ручкой ЗАЗОР на пусковом устройстве. Убедиться, что светлый блик попадает на мишень. При необходимости сдвинуть мишень так, чтобы блик был по центру мишени.

4. Открыть воду и воздух, включить вытяжную вентиляцию.

5. Включить электропитание кнопкой ВКЛ на блоке управления. Зажечь лампу нажатием на кнопку I РЕЖИМ РАБОТЫ.

6. Произвести юстировку излучателя, для чего:

а) маховиком переместить излучатель вниз до появления на экране темного пятна на фоне светлого. Если темное пятно расположено несимметрично или неправильной формы, то необходимо исправить положение путем смещения с помощью ручек поперечного перемещения и поднятия маховиком излучателя, добиваясь острой фокусировки излучения;

б) полученное пятно расплавленной керамики должно быть в центре светлого пятна, правильной формы и диаметром 2 – 3 мм. Сместить излучатель вниз и убедиться, что темное пятно концентрично расплаву. Если этого не получилось юстировку необходимо повторить;

в) погасить лампу кнопкой СТОП и снять мишень.

Порядок выполнения работы

1. Изучить физическую сущность процесса.
2. Ознакомиться с конструкцией и принципом работы светолучевой установки УСС-1.
3. Подготовить образцы для сварки, используя тонколистовой материал из различного металла, разной толщины.
4. Получить практический навык по управлению работой установки УСС-1 под руководством учебного мастера.
5. Установить свариваемое изделие на место сварки.
6. Зажечь лампу как указано в разделе «Подготовка к работе».
7. Установить необходимый режим работы лампы и скорости продвижения свариваемого шва в фокусе системы. Если необходимо произвести подфокусировку вертикальным перемещением отражателя.
8. Осуществить сварку опытных образцов под руководством учебного мастера.
9. После завершения сварки образцов погасить лампу.

10. Определить качество сварных соединений, учитывая применение различных материалов и их толщину.

11. Занести полученные данные в таблицу 3.1

Таблица 3.1

Материал заготовок	Толщина заготовок, мм	Диаметр пятна фокусировки $d_{п}$, мм	Мощность излучения P , Дж/мм ²	Прочность соединения на разрыв, МПа

Содержание отчета

1. Описание физической сущности процесса сварки световым лучом и применяемого оборудования.
2. Характеристики свариваемых материалов.
3. Перечисление технологических возможностей светолучевой сварки.
4. Таблица с исходными данными и результатами контрольной сварки.

Контрольные вопросы

1. В чем заключаются технологические особенности сварки светом.
2. Опишите оптические схемы установок для сварки лучистой энергией.
3. Назовите основные параметры режима сварки лучистой энергией.
4. Укажите области применения сварки светом.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

Технологические особенности микроплазменной сварки и резки

Цель работы – изучить устройство аппарата микроплазменной резки и сварки multiplaz 2500; приобрести практические навыки работы на установке multiplaz 2500; подобрать режимы сварки и резки, обеспечивающие хорошее качество реза.

Устройство плазменной горелки

Плазменная горелка выполнена в форме пистолета. Горелка присоединяется к блоку питания с помощью электрического кабеля. Блок питания с помощью сетевого кабеля подключается к однофазной электросети с напряжением 220 В и частотой 50 Гц через заземленную розетку (типа ЕВРО).

На рис. 4.1 показано устройство плазменной горелки и расположение её основных узлов:

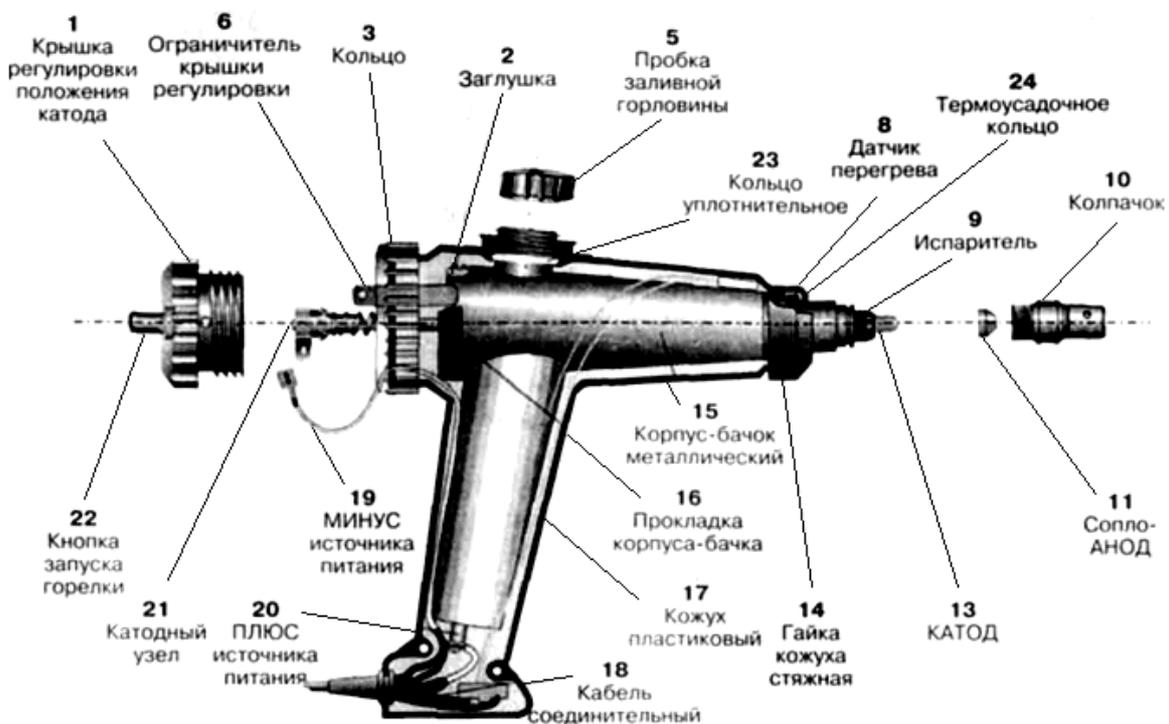


Рис. 4.1 Устройство плазменной горелки.

Все узлы плазменной горелки располагаются в пластмассовом корпусе, состоящем из двух боковин 17.

Металлический корпус-бачок 15 заполнен влагопитывающим материалом.

Подвижный катодный узел 21, на который через ножевой контакт 19 подается отрицательное напряжение от блока питания, состоит из катододержателя, в переднюю часть которого ввинчивается сменный катод 13.

На сопло-анод 11, соединенное с корпусом 15 с помощью колпачка 10, подается положительное напряжение от блока питания (клемма 20).

Сопло-анод 11 и катод 13 образуют разрядную камеру, внутри которой за счет энергии электрической дуги пары рабочей жидкости нагреваются до температуры образования плазмы.

Принцип работы плазмотрона

На приведенном рис. 4.2 упрощенно показан принцип действия плазмотрона. Запуск плазменной горелки, предварительно заправленной рабочей жидкостью, осуществляется после кратковременного нажатия кнопки запуска. При нажатии на кнопку подвижный катодный узел перемещается вперед и упирается наконечником-катодом в сопло-анод, т. е. электрическая цепь «анод-катод» замыкается «накоротко». При отпуске кнопки катодный узел под действием возвратной пружины отходит от сопла-анода, и в разрыве между катодом и внутренней поверхностью сопла-анода возникает электрическая дуга.

Тепловая энергия дуги испаряет окружающую воду и превращает её в пар. Водяной пар под давлением устремляется к выходному отверстию в сопле-аноде. Проходя через зону электрической дуги пар «отрывает» ее от внутренней поверхности сопла, «вытягивает» дугу наружу и замыкает на внешнюю кромку сопла-анода. В узком сечении выходного отверстия пар обжимает электрическую дугу со всех сторон и центрирует её, не давая дуге замкнуться на боковые стенки выходного отверстия.

При взаимодействии с электрической дугой часть водяных паров переходит в так называемое четвертое агрегатное состояние – плазму, температура, которой достигает 8000 °С.

Конструкция горелки обеспечивает ее работоспособность в любом пространственном положении.

В качестве рабочей жидкости при резке может быть использована вода, а при сварке и пайке – 45 %-ная смесь воды со спиртом.

В данной модификации плазмотрона реализовано два вида работ: режим «косвенной дуги», (режим в котором электрическая дуга замыкается на сопло-анод) и режим «прямой дуги» (режим в котором электрическая дуга под действием дополнительного напряжения отрывается от сопла-анода и попадает на обрабатываемый металл).

Отсюда и два режима эксплуатации плазматрона, как в режиме резки металлов, так и в режиме сварки. В дальнейшем режим «косвенной» дуги будет называться «плазменным» (по аналогии с техникой применения), а режим «прямой» дуги будет называться «плазменнодуговым» режимом.

Включение плазменнодугового режима осуществляется потенциометром «MODE II». При этом загорается соответствующий светодиод.

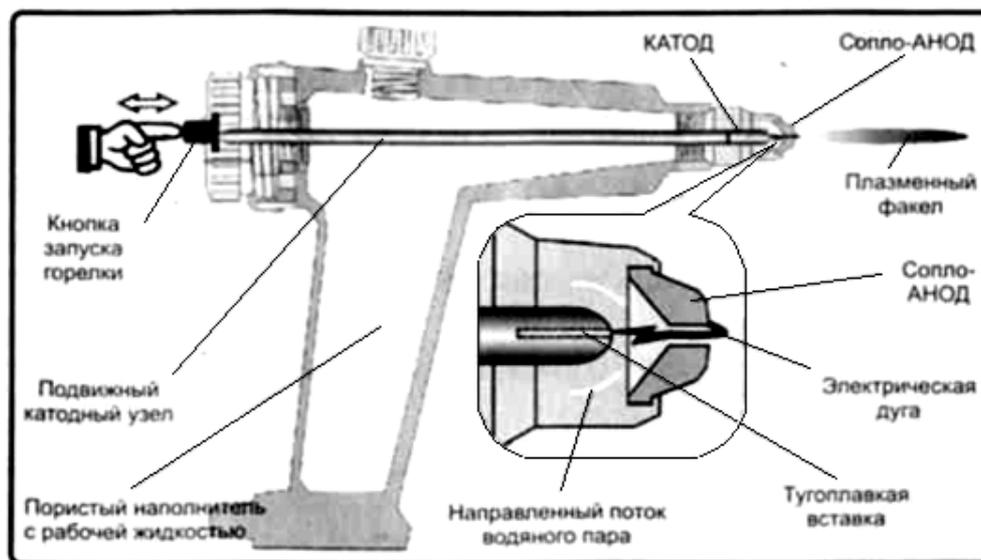


Рис. 4.2 Принцип действия плазматрона.

ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОВЕДЕНИЮ РАБОТ

Меры безопасности при работе с плазматроном

При обслуживании и эксплуатации плазматрона необходимо обязательно соблюдать «Правила безопасной эксплуатации электроустановок потребителей» и требования стандартов системы безопасности труда по ГОСТ 12.3.003-86 и ДСТУ 2456-94.

Необходимо соблюдение следующих мер безопасности:

- чтобы не повредить зрение, при работе в «плазменном» режиме обязательно надевайте специальные защитные очки с темными стеклами, а при работе в «плазменнодуговом» режиме – маску сварщика;
- не используйте аппарат без заземления сетевой розетки;
- не производите резку, сварку или пайку свежоокрашенных конструкций до полного высыхания краски;
- не включайте горелку вблизи легко воспламеняющихся предметов и жидкостей;

- не работайте в одежде, на которой имеются пятна жира, масла, бензина или других горючих жидкостей;
- не проводите резку, сварку, пайку или нагрев открытым пламенем сосудов и трубопроводов, заполненных горючими, радиоактивными или ядовитыми веществами, а также коммуникаций, находящихся под давлением или электрическим напряжением;
- не разбирайте горелку без выключения блока питания;
- не заливайте рабочую жидкость во включенную горелку;
- не отворачивайте полностью крышку управления катодом при включенном выходном напряжении (для предотвращения полного отворачивания крышки в конструкции горелки предусмотрен ограничитель);
- не опускайте в воду горелку при включенном выходном напряжении;
- не оставляйте горелку во включенном состоянии.

Запрещается:

- резка, сварка и пайка окрашенных и оцинкованных металлов в непроветриваемых помещениях;
- применение присадочной проволоки для сварки без держателя присадки, без перчаток сварщика;
- эксплуатация в помещениях с металлическим или сырым полом без применения изолирующего коврика для ног;

Первоначальные регулировки

Убедитесь в том, что на передней панели блока питания горит светодиод OFF и на индикаторе напряжения светятся цифры 000.

Переведите переключатель «MODE I» на передней панели блока в положение 5. Вращая крышку механизма управления катодом, установите свободный ход пусковой кнопки около 3 мм (Рис. 4.3).



Рис. 4.3. Механизм управления катодом

Включение горелки и выведение ее на рабочий режим

Убедитесь в том, что горелка полностью заправлена рабочей жидкостью (признаком полной заправки горелки является подтекание жидкости из центрального отверстия сопла).

Нажмите кнопку «ON», расположенную на передней панели блока питания.

ПРИМЕЧАНИЕ

Наличие напряжения в пределах 2 – 4 вольт не является признаком неисправности прибора.

Убедитесь в том, что загорелся светодиод над кнопкой «ON», показания индикатора находятся в пределах от 200 до 350 В.

В течение 5 секунд после нажатия кнопки «ON» нажмите до упора пусковую кнопку горелки и сразу отпустите ее (рис. 4.4). Следует иметь в виду, что если Вы не нажали пусковую кнопку горелки в течение 5 секунд, то напряжение, подаваемое на горелку от блока питания, автоматически выключается. Если такое произошло, то необходимо **повторно нажать кнопку «ON» на блоке питания и в течение 5 секунд нажать пусковую кнопку горелки.**



Рис. 4.4 Пуск горелки микроплазматрона

Убедитесь в том, что показания индикатора напряжения находятся в пределах от 30 до 70 В.

Через несколько секунд после нажатия пусковой кнопки из сопла горелки должен появиться факел, а напряжение увеличится до 120 – 140 В. После прогрева горелки факел становится короче (20 – 30 мм) и приобретает оранжевый или фиолетовый оттенок. Это свидетельствует о том, что горелка вышла на рабочий режим и готова к работе.

Регулировка режимов

Режим мощности на блоке питания устанавливается в зависимости от толщины обрабатываемого металла и характера выполняемых работ. Каждый режим мощности характеризуется показаниями напряжения на цифровом индикаторе.

С помощью переключателя «MODE I» на передней панели блока питания устанавливается сила тока косвенной дуги горелки, а с помощью регулировочной крышки на горелке – необходимое для данного режима напряжение.

Пример

Вы производите плазменную сварку деталей толщиной 0,7 мм установив переключатель «MODE I» в положение 6. Индикатор показывает напряжение 170 Вольт (оптимальное для всех режимов), металл такой толщины при выбранной силе тока и стандартном напряжении – прожигается. Следовательно – необходимо уменьшить мощность (т. е. уменьшить силу тока дуги) и перейти на более низкий режим, например – 4.

При попытке резкого переключения из режима 6 в режим 4 дуга может сорваться и плазменный факел погаснет.

Чтобы избежать исчезновения факела следует сначала из режима 6 перейти в следующий, более слаботочный режим – режим 5 и крышкой механизма управления катодом подрегулировать напряжение до 170 Вольт. И только затем перейти в режим 4 и снова понизить напряжение до 170 Вольт с помощью регулировочной крышки.

При вращении регулировочной крышки против часовой стрелки расстояние между анодом и катодом увеличивается, и напряжение возрастает – показания индикатора увеличиваются. При вращении крышки по часовой стрелке межэлектродное расстояние уменьшается, напряжение падает – показания индикатора уменьшаются.

С помощью регулятора «MODE II» на передней панели блока питания осуществляется включение плазменнодугового режима работы и регулировка величины тока в этом режиме (при этом загорается светодиод «MODE II»).

При необходимости выключения плазменнодугового режима установите регулятор «MODE II» в левое крайнее положение, при этом светодиод «MODE II» должен погаснуть.

ПРОВЕДЕНИЕ РАБОТ С ПЛАЗМОТРОНОМ

Работа в режиме «резка»

Для резки применяется сопло-анод с диаметром отверстия от 1,0 до 1,1 мм. Для получения ровного реза и повышения скорости рекомендуется использовать различного рода приспособления (линейки, лекала, циркули) для фиксации корпуса горелки относительно поверхности металла. Выберите такую скорость перемещения, чтобы избежать искривления (излома) плазменного потока на выходе из металла. При слишком большой скорости факел на выходе из металла искривляется, рез получается некачественным.

Плазмотрон обеспечивает резку различных материалов в двух режимах работы:

- в «плазменном» режиме обеспечивается резка как металлических, так и неметаллических материалов;
- в «плазменнодуговом» режиме обеспечивается резка только электропроводящих материалов.

Независимо от режима резки расстояние между соплом-анодом и разрезаемым материалом необходимо поддерживать – 0,5 – 1,5 мм.

Для поддержания постоянного зазора можно использовать насадку с упорами, имеющуюся в составе комплекта поставки.

При резке в «плазменном» режиме допускается соприкосновение сопла-анода и металла в случае, если электродуговой режим выключен и светодиод «MODE II» не горит.

При этом горелку желательно держать под небольшим наклоном к разрезаемой поверхности. Наклон горелки обеспечивает необходимый зазор между отверстием сопла-анода и разрезаемым металлом.

Для обеспечения резки в плазменнодуговом режиме необходимо проводом соединить корпус блока с разрезаемым металлом.

При приближении горелки к разрезаемому металлу на расстоянии 1,5 – 2,0 мм дуга с сопла-анода переходит на разрезаемый металл автоматически. Горелку в этом режиме предпочтительно держать перпендикулярно разрезаемой поверхности.

Образовавшийся слой с обратной стороны легко удаляется кусачками.

Для увеличения срока службы плазмотрона при резке материалов направляйте горелку не обычной водопроводной, а кипячёной или дистиллированной водой.

Работа в режиме «сварка»

Для получения качественного шва при сварке металлов горелка направляется водно-спиртовой смесью (55 % воды и 45 % спирта). Может использоваться технический спирт – этиловый, изопропиловый, изобутиловый и т. д.

При сварке применяйте сопло-анод с диаметром отверстия от 2,0 до 2,3 мм. В качестве сопла для сварки можно использовать выработавшее свой ресурс сопло для резки. Для этого расточите в нем центральное отверстие сверлом соответствующего диаметра и снимите наружную фаску сверлом Ø 3 мм.

Прибор обеспечивает качественное сварное соединение, как при сварке с присадочной проволокой, так и без нее (например, при сварке «внахлест»).

Данная модификация плазмотрона обеспечивает возможность проведения как «плазменной» так и «плазменнодуговой» сварки.

Для проведения работ в режиме «плазменной» сварки установите потенциометр «MODE II» в крайнее левое положение. При этом светодиод «MODE II» должен погаснуть.

При проведении работ в режиме «плазменной» сварки держите горелку под наклоном к свариваемой поверхности для предотвращения выдувания жидкого металла из сварочной ванны. Приёмы работы в этом режиме аналогичны работе с обычной ацетиленовой горелкой.

При «плазменной» и «плазменнодуговой» сварке может быть использована присадочная проволока СВ-08ГС, СВ-08Г2С, СВ-10ГС, СВ-10ГСМ, СВ-12ГС и др.

При сварке алюминия рекомендуется использовать флюсы Ф-34А, ФА-40, АФ-4А и соответствующие присадочные материалы.

Для проведения работ в режиме плазменнодуговой сварки соедините с помощью провода, входящего в комплект поставки, земляной вывод блока питания со свариваемым металлом.

При сварке в плазменнодуговом режиме держите горелку вертикально к свариваемой поверхности.

Приближение сопла-анода горелки к свариваемому металлу на 1,5 – 2,0 мм приводит к автоматическому переключению электрической дуги с сопла-анода на свариваемый металл.

Чтобы избежать прожигания металла, необходимо делать небольшие круговые движения горелкой, сохраняя расстояние между соплом-анодом и поверхностью свариваемого металла 2,0 – 4,0 мм.

В случае необходимости использования присадочной проволоки, закрепите ее в держатель присадки, входящий в комплект поставки, и подавайте по мере необходимости в сварочную ванну.

По мере необходимости удаляйте прилипшие к соплу-аноду брызги расплавленного металла с помощью напильника.

Для обеспечения возможности сварки в труднодоступных местах используйте сварочное сопло с «косым» выходом, входящее в комплект поставки.

Для предотвращения образования ржавчины сразу после окончания сварки протрите сварной шов и прилегающий к нему металл влажной тканью.

Регулировка режимов мощности при сварке

При сварке в зависимости от толщины и вида металла, а также способа сварки, экспериментально подберите нужное положение переключателя «MODE I» (для «плазменной» сварки) и переключателей «MODE I», «MODE II» (для «плазменнодуговой» сварки).

Рекомендуемые положения переключателя «MODE I» на блоке питания в зависимости от толщины свариваемого встык стального листа в режиме «плазменной» сварки приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Толщина листа	«MODE I»
до 0,8	1
0,8 до 1,2	2
1,2 до 2,0	3
2,0 до 3,0	4
3,0 до 4,0	5
4,0 до 6,0	6

Рекомендуется поддерживать показания индикатора на блоке питания в пределах от 160 до 180 В для всех положений переключателя «MODE I».

При сварке тонких листов можно поддерживать показания индикатора напряжения в пределах 120 – 140 В.

Рекомендуемые положения переключателя «MODE I» и потенциометра «MODE II» на блоке питания в зависимости от толщины свариваемого встык стального листа в режиме «плазменнодуговой» сварки приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Толщина листа	«MODE I»	«MODE II»
2,0 до 3,0	3	4
3,0 до 4,0	3	5
4,0 до 5,0	3	6
5,0 до 10,0	4	max

Рабочее напряжение устанавливается с помощью крышки управления катодом горелки в пределах 140 – 160 В.

Работа в режиме «пайка»

Рекомендации и требования к режиму «пайка» полностью соответствуют аналогичным рекомендациям и требованиям режима «газовая сварка» – тот же диаметр сопла-анода, та же рабочая жидкость, те же методы запуска и выведения горелки на режим, замены сопла-анода, заправки, охлаждения, выбора режимов.

Отличие – в используемых присадочных материалах и флюсах.

Медные трубы с фитингами и трубы между собой спаиваются только с применением капиллярного раструбного соединения. Поверхности стыка, т. е. внутренняя часть раструба и наружный конец трубы, непосредственно перед пайкой должны быть очищены до металлического блеска с помощью абразивной бумаги или стальной щетки.

Существуют два вида пайки – мягкая и твердая, различающиеся между собой температурой процесса. Мягкая пайка производится при температуре ниже 450 °С, например с помощью припоя (по DIN 1707) L-SnCu3 или L-SnAg5. Твердая пайка производится при температуре выше 450 °С, например с помощью припоя L-Ag45Sn при $t = 670$ °С, L-Ag44 при $t = 730$ °С и др.

Флюс защищает очищенные поверхности от окисления при нагреве и обеспечивает хорошее смачивание поверхности расплавленным припоем. Разогрев места пайки производится круговыми движениями несколько большими, нежели в режиме «сварка», поскольку для лучшего растекания припоя необходимо разогреть большую площадь металла. Не следует нагревать подаваемый припой до плавления. Расплавление припоя происходит при его соприкосновении с прогретым металлом.

В качестве флюса может быть применена бура, борная или соляная кислота. Хорошие результаты получаются при применении флюса 209. Для пайки алюминия рекомендуется использовать флюс Ф-34А.

Порядок проведения работы

1. Произвести резку образцов толщиной 1, 2 и 3 мм в плазменном режиме используя различные значения напряжения. Определить оптимальные режимы при различных толщинах металла.

Полученные данные свести в таблицу 4.3.

Таблица 4.3

Материал образца	Толщина образца, мм	Плазмо-образующий газ	Напряжение резки, В	Ширина реза	Качество реза

2. Произвести сварку образцов в плазменно-дуговом режиме для различных типов швов (стыковое, нахлесточное и угловое сварные соединения).

Полученные данные свести в таблицу 4.4.

Таблица 4.4

Материал образца	Тип шва	Параметры присадки	Напряжение резки, В	Качество шва

Содержание отчета

1. Описание физической сущности и схемы процесса микроплазменной обработки материалов.
2. Исходные данные и оптимальные режимы микроплазменной резки и сварки.
3. Сделать выводы по выполненной работе.

Контрольные вопросы

1. Что называется микроплазмой?
2. Какие газы применяются в качестве плазмообразующих?
3. Чем отличается микроплазмотрон прямого действия от микроплазмотрона косвенного действия?
4. Для разделения каких материалов применяется микроплазменная резка?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

Газотермическая наплавка (напыление) различных типов деталей с использованием порошковых смесей

Цель работы — изучить технологические особенности газопорошковой наплавки; приобрести практические навыки.

Оборудование и материалы:

1. Газосварочный пост.
2. Наплавочная горелка ГН-3.
3. Вращатель.
4. Набор сит.
5. Сушильный шкаф.
6. Дробеструйная установка.
7. Набор различных порошков.

Физическая сущность процесса

Газотермическое нанесение покрытий разделяют на наплавку, напыление и напыление с оплавлением.

Газопорошковая наплавка

Газопорошковая наплавка позволяет упрочнять детали сложной конфигурации слоем минимальной толщины (0,1 мм и выше) без разбавления основным металлом, так как переходная зона при этом составляет всего 100... 120 мкм. Кроме того, при газопорошковой наплавке обеспечиваются благоприятные условия для предотвращения окисления и испарения компонентов наплавляемого металла.

Процесс газопорошковой наплавки осуществляется при помощи специальных горелок (рис. 5.1), для работы которых чаще используют ацетилено-кислородное пламя. Состав пламени определяют на основании законов химического равновесия. Установлено, что только нормальное пламя обладает необходимыми для рассматриваемого процесса свойствами.

Теоретические исследования и экспериментальные данные показывают, что кислородно-ацетиленовое пламя обладает высокой температурой, которая на 200... 300° выше температуры пламени других горючих смесей. Состав пламени частично влияет на производительность наплавки, но в основном определяет металлургические процессы при плавлении и затвердевании металла. Характерным признаком неправильной регулировки пламени может служить пористость наплавленного металла. Например, при избытке кислорода пористость появляется за счет образования соединения СО, при избытке ацетилена возникает водородная пористость.

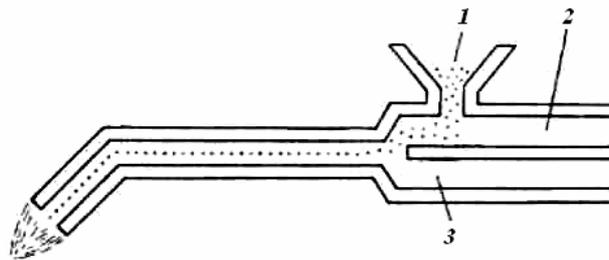


Рис. 5.1. Схема горелки для газопорошковой наплавки:

1 – бункер с порошком наплавляемого материала; 2 – канал для подачи кислорода;
3 – канал для подачи горючего газа

При инжектировании порошка в горелку с осевой подачей порошка состав горючей смеси может изменяться, так как в процессе наплавки под влиянием инжектирующего действия кислородной струи вместе с частицами порошка происходит подсос воздуха, в результате отрегулированный состав нейтрального пламени становится окислительным. Это необходимо учитывать при работе с газопорошковыми горелками.

Для увеличения прочности сцепления покрытия с основой и повышения коэффициента использования наносимого порошкового материала на поверхности детали, необходимо получить шероховатость с микронеровностями, соизмеримыми с размерами частиц порошка. Нужна также очистка поверхности от оксидов и пыли. Это обеспечивается струйной обработкой поверхности детали с применением песка, колотой стальной дроби или корунда.

Если деталь прецизионная, т. е. номинал имеет жесткий допуск в местах посадки, ее предварительно шлифуют. Припуск на предварительную шлифовку составляет примерно 0,1... 0,5 мм на сторону и соизмерим с толщиной наплавленного покрытия.

Закаленную деталь необходимо подвергать термообработке (отжигу и охлаждению с печью или отпуску), чтобы предотвратить возникновение внутренних напряжений в процессе наплавки.

Перед наплавкой деталей большой массы (более 10 кг) или сложной формы следует осуществлять их общий подогрев в печи или специальными горелками до 573... 673 К. Детали небольших размеров и массы можно нагревать непосредственно наплавочной горелкой. Для защиты места наплавки от окисления следует проводить предварительное напыление порошка на поверхность детали, нагретой до указанной температуры. При температуре наплавляемой поверхности ниже 573 К затрудняется схватывание с ней частиц порошка, а при температуре выше 673 К увеличивается толщина окисных пленок.

Эффективность газопорошковой наплавки зависит от присадочного порошкового материала, его однородности, размеров частиц, их формы, наличия механических примесей. В качестве присадочного материала исполь-

зуют порошки со сферической формой частиц грануляцией 20... 106 мкм. Порошки получают с легирующими добавками бора и кремния. Они вызывают самофлюсующее действие, снижая температуру плавления порошкового материала. Так как бор и кремний снижают пластичность сплавов, их содержание ограничено несколькими процентами (1... 5 %). Однако этого достаточно, чтобы значительно снизить температуру плавления сплавов. Большинство сплавов плавится в интервале температур 1323... 1423 К, а сплавы с высоким содержанием В и Si – при 1233... 1333 К. Связь с подложкой достигается в процессе диффузии, при этом прочность наплавленного соединения на разрыв составляет 200... 400 МПа.

Одним из недостатков большинства наплавленных покрытий является их низкая ковкость (< 2 %). Для увеличения ковкости наплавленного слоя в материал для наплавки добавляют гранулы чистого никеля, который окончательно не растворяется в затвердевшем наплавленном металле. Наличие никеля повышает ковкость покрытий до 5 %.

Газопорошковое напыление

Газопламенный способ напыления покрытий состоит в формировании на поверхности изделий слоя частиц напыляемого материала, обладающих достаточным запасом тепловой и кинетической энергии в результате взаимодействия со струей газового пламени. Струя пламени образуется в результате сгорания горючей смеси, вытекающей из сопловых отверстий горелки с большой скоростью. Температура струи (горючий газ – кислород) при использовании ацетилена достигает 3200 °С, а скорость истечения – от 150... 160 м/с до сверхзвуковой скорости. Попадая в струю, частицы материала нагреваются до жидкого или высокопластичного состояния и приобретают скорость от 20... 80 до 1000 м/с и более. Скорость полета напыляемых частиц зависит от конструкции аппарата, соотношения кислорода и горючего газа в смеси, количества обдувающего газа, расстояния от среза сопла, количества вводимого в пламя напыляемого материала и его плотности, гранулометрического состава и др.

В современных газопламенных распылителях, используемых для напыления защитных покрытий, материал в виде проволоки, гибкого шнура, стержня или порошка подается через сопловой наконечник, в котором concentрично с каналом для прохода материала выполнены каналы для подачи горючей смеси в зону нагрева. При сгорании горючей смеси образуется кольцевое пламя, которое нагревает поступающий материал до высокопластичного или жидкого состояния и переносит его частицы на напыляемую поверхность.

В случае нанесения покрытий с использованием материалов в виде проволоки, гибких шнуров и стержней существует стадия диспергирова-

ния, т. е. «сдувание» тонкого слоя расплавленного жидкого материала и дробление его на мелкие частицы. Диспергирование осуществляется потоком сжатого воздуха, который подается в камеру, образованную расположенным концентрично вокруг первого соплового наконечника воздушным соплом. Поток сжатого газа сдувается слой расплавленного металла и с большой скоростью диспергируемые частицы переносятся на напыляемую поверхность. Поэтому один из основных недостатков процесса напыления материалов в форме гибкого шнура и стержня – потери тепловой энергии на диспергирование компактного исходного материала.

Материал, используемый для газопламенного напыления покрытий, не должен разлагаться и возгоняться в пламени, должен иметь достаточную разницу между температурами плавления и кипения. Ниже приведена температура пламени для горючих смесей разного состава.

Состав смеси	Температура, °С
Кислород – ацетилен	3100
Кислород – бутан	3100
Кислород – пропан	2760
Кислород – водород	2700
Кислород – светильный газ	2000
Воздух – ацетилен	2325
Воздух – водород	2055
Воздух – светильный газ	1530

В качестве рабочих газов чаще используют ацетилен (ГОСТ 5457-75), кислород (ГОСТ 5583-79), пропан-бутан (ГОСТ 20448-80), азот (ГОСТ 9293-74) или сжатый воздух, очищенный от масла и влаги. Воздух, азот или другой сжатый газ применяют для охлаждения сопловой части горелки и обдува факела пламени. Обдув факела пламени способствует его «обжиму» и повышает скорость полета частиц порошка.

Сущность газопламенного напыления порошков полимеров заключается в том, что предварительно нагретые в пламени горелки частицы порошка контактируют с покрываемой поверхностью, которая нагрета до температуры, определяемой свойствами наносимого полимера. При соприкосновении с поверхностью частицы порошка оплавляются и, сливаясь друг с другом, образуют слой покрытия.

Технологический процесс нанесения покрытий включает подготовку полимерного материала и детали и собственно нанесение покрытия. Перед напылением порошок выдерживают в сушильном шкафу при температуре 50... 60 °С в течение 5... 6 ч и просеивают через сито с сеткой № 0,16... 0,25 (ГОСТ 3584-73).

Перед напылением поверхность нагревают в печах (небольшие детали) или газовой горелкой (крупногабаритные детали) до температуры, при которой полимер

приобретает жидкотекучесть. Нагрев крупногабаритных деталей начинают с небольших участков, на которые по достижению требуемой температуры наносят покрытие, нагрев разностенных деталей – с участков, имеющих наибольшую толщину.

В качестве дополнительной обработки покрытий из полимеров применяют прикатывание роликом и оплавление покрытия в сушильном шкафу. Для повышения плотности покрытия (из порошков ПФН-12 и ТПФ-37) нанесенный слой после напыления прикатывают роликом, который перед этим выдерживают, а во время прикатывания периодически охлаждают в холодной воде. Затем покрытие прогревают пламенем горелки, наносят следующий слой порошка, который также прикатывают роликом. Напыление с последующим прикатыванием осуществляют до получения требуемой толщины покрытия.

В некоторых случаях нанесенные покрытия подвергаются дополнительному оплавлению в шкафу, где температура должна быть на 10... 15° ниже температуры растекания материала.

Дефекты на покрытиях из полимеров в виде отдельных вздутий, свищей, пузырей, засоров устраняют следующим образом. На небольшом участке вокруг дефекта удаляют покрытие с поверхности, а края оставшегося покрытия срезают ножом или другим инструментом. Подготовленное место покрывают заново. При зачистке дефекта на поверхности рекомендуется оставлять небольшой слой полимера во избежание перегрева наносимого слоя.

Основные достоинства газопламенного напыления покрытий:

- относительно малое тепловое воздействие на подложку, что позволяет наносить покрытия на поверхность различных материалов, включая пластмассы, дерево, картон и т. п.

- толщина покрытия может быть обеспечена от 50 мкм до 10 мм и более;

- возможность регулирования газового режима работы горелки позволяет управлять химическим составом среды (восстановительная, нейтральная, окислительная) и энергетическими характеристиками струи и напыляемых частиц;

- высокая производительность процесса (например, 8... 10 кг/ч для пороков самофлюсующихся сплавов при расходе ацетиленового газа 0,9 м³/ч) и высокий коэффициент использования материала (0,60... 0,95);

- возможность нанесения покрытий на изделия практически без ограничения их размеров при наличии необходимых средств механизации и обеспечения правил техники безопасности;

- низкий уровень шума и излучений;

- возможность нанесения покрытий при любом пространственном положении аппарата;

- легкость и простота обслуживания оборудования; гибкость технологии и мобильность оборудования, что позволяет осуществлять напыление на месте, без демонтажа изделий;

– возможность автоматизации процесса и встройки в автоматическую линию с небольшими затратами и др.

Основными недостатками газопламенного способа напыления покрытий из порошковых материалов являются:

- недостаточная прочность сцепления покрытий с основой (5... 45 МПа) при испытании на нормальный отрыв;
- наличие пористости (обычно в пределах 5... 25 %), которая препятствует применению покрытий в коррозионных средах без дополнительной обработки;
- невысокий коэффициент использования энергии газопламенной струи на нагрев порошкового материала (2... 12 %).

Порядок проведения работы

1. Просеять порошок на фракции 63... 200 мкм, используя набор сит.
2. Просушить исходный порошок в сушильном шкафу при температуре 200 °С.
3. Подготовить поверхности образцов:
 - а) зачистить от механических загрязнений (окалина, краска и др.);
 - б) обезжирить;
 - в) дробеструйная обработка поверхности.
4. Произвести наплавку.
5. Оценить качество наплавки и занести данные в таблицу 5.1.

Таблица 5.1

Материал образца	Состав фракции	Расход газа, л/мин	Дистанция напыления, мм	Качество наплавки

Содержание отчета

1. Описание физической сущности и схемы процесса газотермических покрытий.
2. Подобрать оптимальные режимы нанесения газотермических покрытий.
3. Сделать выводы по выполненной работе.

Контрольные вопросы

1. Достоинства газопламенного напыления покрытий.
2. Опишите технологию подготовки поверхности под нанесения газотермических покрытий.
3. Опишите процесс газопорошковой наплавки.
4. Область применения газотермических покрытий.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

Нанесение защитных покрытий электродуговой металлизацией с использованием проволочных электродов

Цель работы – изучить технологические особенности металлизации; приобрести практические навыки.

Оборудование и материалы:

1. Металлизатор ЭМ-9.
2. Воздушный ресивер.
3. Вращатель.
4. Проволочные электроды.

Физическая сущность процесса

Под электродуговой металлизацией понимается процесс напыления расплавленного электрической дугой металла на поверхность детали. Расплавленный металл распыляют струей сжатого воздуха.

Металлизация дает возможность покрывать поверхности деталей почти из всех металлов независимо от формы поверхностей.

Толщина наносимого слоя металла может колебаться от 20 – 30 микрон до 6 – 8 мм и более.

Процесс электродуговой металлизации осуществляется с помощью специального аппарата – металлизатора. Аппарат состоит из следующих частей: механизма для протягивания проволок, механизма для подачи газа, токопроводящей сети, направляющих наконечников для проволоки.

Аппарат действует следующим образом. Две проволоки из распыляемого металла по направляющим наконечникам, к которым подведен электрический ток, непрерывно подаются к месту возбуждения электрической дуги. Возникающая между проволоками электрическая дуга расплавляет металл.

Одновременно по воздушному соплу в зону дуги поступает сжатый газ под давлением 5 – 6 атм. Струей сжатого газа расплавленный металл распыляется на частицы размером 0,001 – 0,002 мм (иногда встречаются более крупные частицы до 0,2 мм). Подхваченные струей сжатого газа частицы металла приобретают большую скорость (до 250 м/сек) и, ударяясь о поверхность детали, соединяются с ней.

Для хорошего сцепления распыленных частиц деталь должна иметь шероховатую поверхность. Шероховатости должны быть достаточной ширины, чтобы частицы средних размеров могли войти в углубления, не образуя мостиков над ними.

Многочисленные испытания показали, что при сухом трении металлизированный слой работает на истирание, как правило, значительно хуже, чем основной металл. В условиях жидкостного и полужидкостного трения металлизированный слой работает удовлетворительно.

Наибольшее значение имеет металлизация при восстановлении шеек коленчатых валов, вышедших за пределы ремонтных размеров. Металлизация применяется также для восстановления шеек распределительных валов, полуосей, поворотных кулаков колесных тракторов, наращивания наружных поверхностей втулок, верхних головок шатунов и т. п.

Металлизацию используют для нанесения на вкладыши и подшипники антифрикционного слоя свинца и алюминия, цинка и алюминия или бронзы.

Металлизацией нельзя восстанавливать детали, подвергающиеся ударным нагрузкам (кулачки распределительных валов, зубья шестерен и т. д.), а также небольшие поверхности и грани, несущие значительные нагрузки (резьба, канавки под поршневые кольца и т. д.).

Восстановление деталей с помощью электродуговой металлизации состоит из следующих операций:

- подготовки поверхности деталей;
- металлизации деталей;
- обработки детали после металлизации.

Подготовка поверхности деталей к металлизации. Детали, подвергающиеся металлизации, предварительно тщательно обезжиривают в 10 %-ном растворе щелочи NaOH или соды Na_2CO_3 , нагретом до температуры 70 – 80°. После этого детали промывают в горячей воде и сушат. Для лучшего сцепления с наносимым слоем металла поверхность детали делают шероховатой. Распространенными способами получения шероховатой поверхности детали являются: обработка дробью, прямозубая накатка, пескоструйная обдувка, треугольная нарезка с последующей обдувкой дробью, электроискровая обработка, насечка зубилом, нарезка закругленным резцом, треугольная нарезка, электродуговая обработка с подачей струи сжатого воздуха к дуге, нарезка кольцевых канавок.

Обработка дробью выполняется в дробеструйной установке чугунной дробью диаметром 0,4 – 0,5 мм.

Прямозубую накатку получают с помощью накатки с прямым зубом. Шаг накатки 0,8 мм; скорость вращения детали 150 об/мин. При накатке на поверхности образуется ряд параллельных осей детали канавок.

Для пескоструйной обработки деталей применяют специальные пескоструйные аппараты.

Стальные и чугунные детали обрабатывают сухим горным кварцевым песком. Для обработки тонких деталей используют песок с зернами величиной 1 – 1,5 мм, а для обработки грубых деталей – песок с частичками размером 2 – 2,5 мм. Оптимальное давление при обработке стальных и чугунных деталей 6 атм.

Угол наклона сопла к поверхности обрабатываемой чугунной детали 80 – 90°, к поверхности стальной детали 45 – 67°. Расстояние от сопла пистолета до детали 100 мм. Воздух, необходимый для распыления песка, должен быть очищен от влаги и масла в специальных масловлагоотделителях.

Треугольную нарезку (с последующей обработкой дробью) выполняют резцом с углом в плане, равным 60°. Шаг резьбы 0,8 мм, глубина резания 0,5 мм, скорость резания 4,5 – 6 м/мин. После нарезки резьбы деталь обрабатывают чугунной дробью диаметром 0,4 – 0,5 мм.

Нарезка резцом, имеющим угол в плане, равный 60°, и режущую грань, закругленную по радиусу $r = 0,4 - 0,5$ мм, выполняют с шагом 0,8 мм и глубиной 0,5 мм.

Треугольная нарезка с «рваной» поверхностью ниток обеспечивает хорошее сцепление металлизированного слоя с основанием. Нарезку выполняют резцом, передний угол которого равен 0°, а угол при вершине около 60°. Резец устанавливают несколько ниже центра детали.

После предварительной обработки поверхности деталь подвергают *металлизации*. Деталь следует металлизировать после предварительной обработки, но не позже чем через 2 часа, чтобы избежать возможной коррозии или засорения подготовленной поверхности.

Температура в металлизационном цехе должна быть равной или меньше температуры механического цеха, в котором готовилась деталь, так как в противном случае на детали будет конденсироваться влага, которая уменьшает прочность сцепления наращиваемого слоя с основным металлом.

Металлизационный слой наносят на детали с помощью металлизационных пистолетов.

Для работы металлизационной установки необходим сжатый воздух, нагнетаемый под давлением 6 – 7 атм. компрессором производительностью 3 – 5 м³/мин. Компрессор должен быть снабжен ресивером (воздухосборник) емкостью 2 – 3 м³ и масловлагоотделителем. Установка должна иметь трансформатор, понижающий напряжение с 220 или 127 до 40 В.

Процесс металлизации прерывист, и во время работы пистолета слышен характерный шум, который объясняется различными стадиями процесса. На качество покрытия оказывают влияние следующие факторы: давление воздуха, распиливающего металл, расстояние от сопла пистолета до детали, ток, напря-

жение, скорость подачи проволоки, скорость перемещения поверхности детали относительно струи распиливаемого металла (в м/мин); скорость перемещения пистолета параллельно оси вращения детали на один оборот детали (в мм).

С увеличением давления воздуха увеличиваются скорость полета частиц, сила удара их о поверхность детали (или о ранее отложенный слой), скорость охлаждения частиц, связанная с закалкой наращиваемого металла, а также степень окисления частиц. Таким образом, с повышением давления воздуха до определенного предела (до 4,5 – 5,5 атм.) твердость и износостойкость слоя увеличиваются.

Пониженная твердость и износостойкость покрытий при малых давлениях воздуха объясняются малой плотностью слоя, вызываемой малой скоростью частиц, а также перегревом поверхности. При увеличении давления воздуха (более 5,5 атм.) скорость частиц увеличивается, но твердость их, достигнув максимального значения, остается постоянной, так как скорость охлаждения металла почти не изменяется. Изменение износостойкости связано с интенсивным окислением частиц при повышении давления воздуха. Давление воздуха может несколько изменяться от указанных выше пределов (4,5 – 5,5 атм.) в зависимости от конструкции пистолета.

Скорость частиц находится в обратной зависимости от диаметра сопла и расстояния от сопла до места образования дуги.

С изменением расстояния между соплом пистолета и наращиваемой поверхностью изменяется качество покрытия. При небольшом расстоянии поверхность детали перегревается, уменьшаются твердость и износостойкость наращиваемого слоя. Обычно применяют проволоку диаметром 1 – 1,5 мм. Ток при металлизации, зависящий от толщины применяемой проволоки, принимают равным 90 – 150, а при напряжении (рабочем) 30 – 35 В. Ток и напряжение не оказывают особого влияния на качество покрытия.

Скорость подачи проволоки определяется диаметром последней и в процессе металлизации может изменяться в очень небольших пределах, так как с увеличением скорости проволока не успевает плавиться и отрывается кусками, а при недостаточной скорости дуга прерывается, и процесс проходит с большими перебоями или прекращается.

Скорости перемещения поверхности детали относительно струи распиливаемого металла и пистолета параллельно оси вращения детали существенно влияют на качество покрытия. Находясь в воздухе, напыленный слой сильно окисляется, и при повторном нанесении прочность сцепления частиц уменьшается. Рекомендуется за один проход пистолета, т. е. за время одного перемещения пистолета вдоль детали наращивать на последнюю

слой необходимой толщины. Обычно принимают скорость перемещения детали в пределах 5 – 15 м/мин, а скорость перемещения пистолета – в пределах 1,5 – 5 мм/об. При обработке металлизированных покрытий хорошие результаты дают резцы с пластинками из твердых сплавов.

Перед проточкой рекомендуется пропитать слой маслом. Для этого детали следует поместить в ванну с маслом на 1,5 – 2 часа. Металлизированную деталь обрабатывают при скорости резания 10 – 15 м/мин, подаче 0,2 – 0,5 мм/об и глубине резания до 1 мм.

При проточке одновременно проверяют качество сцепления слоя с поверхностью детали. Если во время проточки слой не отлетает от поверхности, то это до некоторой степени гарантирует надежную работу детали в процессе эксплуатации.

Металлизированные стальнойю детали шлифуют на обычных шлифовальных станках при режимах, принятых при шлифовке стальных деталей, применяя шлифовальные круги с более мягкой связкой.

Описание конструкции аппарата ЭМ-9

Аппарат ЭМ-9 представляет собой электрометаллизатор ручного типа, который может быть использован как для проведения работ вручную, так и всякого рода станочных работ.

Аппарат ЭМ-9 состоит из 4-х основных частей:

- А. Корпуса с крышкой.
- В. Механизма подачи проволоки, заключенного внутри корпуса.
- С. Пневматического ротационного привода с центробежным регулятором числа оборотов, расположенного в рукоятке аппарата.
- Д. Распылительной головки, расположенной на стенке корпуса аппарата.

А. Корпус (рис. 6.1).

Корпус аппарата 1 и крышка к нему изготовлены из алюминиевого сплава. Сжатый воздух от сети подводится к аппарату через пробковый кран 3. В утолщенной передней стенке корпуса имеется вертикальный канал, через который в камеру «а» подается сжатый воздух, предназначенный для распыления. Подача воздуха на ротационный привод происходит по каналу «б», рассверленному в нижней части корпуса.

При открывании крана сжатый воздух одновременно подается как в распылительную головку, смонтированную на передней стенке корпуса, так и в камеру ротационного привода.

Кроме распылительной головки, на передней стенке корпуса закреплена пластмассовая колодка 4 с крышкой 5, служащая для закрепления токоподводящих проводов.

Для закрепления аппарата при работе на станке в нижней части корпуса предусмотрено отверстие «в», в которое вставляется специальная оправка, зажимаемая в резцедержатель. На приливе передней стенки закреплена штифтом 6 крышка корпуса и подвесное кольцо 7 для подвешивания аппарата на крючке.

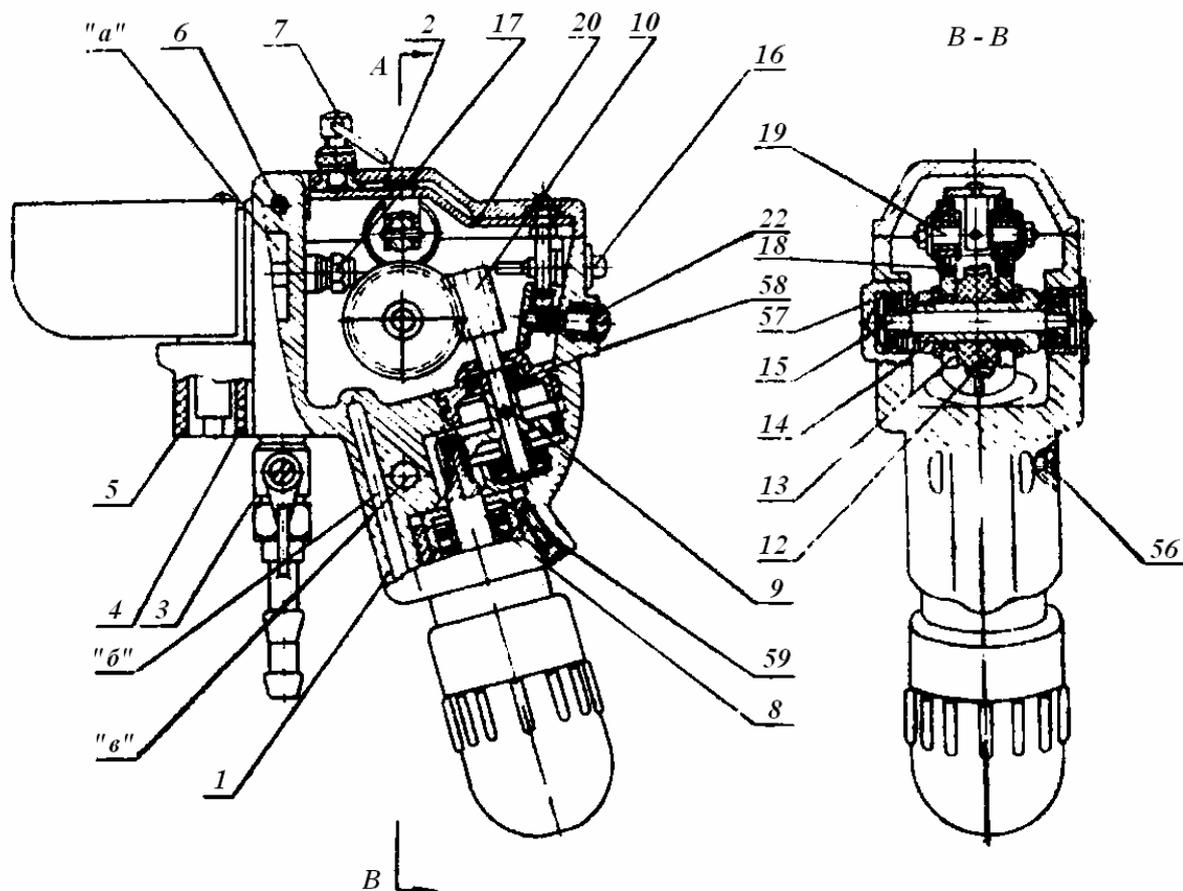


Рис. 6.1. Схема электрометаллизатора ЭМ-9

Б. Механизм подачи проволоки (см. рис. 6.1).

Механизм подачи проволоки смонтирован внутри корпуса аппарата. Он представляет собой двухступенчатый редуктор, состоящий из одной червячной пары, одной цилиндрической пары и устройства для прижима проволоки.

Механизм приводится в движение ротационным пневматическим приводом, на хвостовике ротора которого нарезана ведущая шестерня 8.

Вращение ведущей шестерни передается шестерне 9, сидящей на одном валике с червяком 10, который через червячное колесо 11 вращает центральный узел аппарата.

Последний смонтирован на свободно вращающемся на шарикоподшипниках валике 15 и представляет собой втулку 13, на которую напрессованы и затянуты гайкой 14 червячное колесо 11 и подающие ролики 12, цилиндрическая поверхность которых снабжена острыми зубьями.

Прижим проволоки к подающим роликам осуществляется прижимными роликами – шарикоподшипниками 18, смонтированными на оси 19.

Ось 19 шарнирно подвешена к плоской пружине 20, закрепленной одним концом на крышке аппарата.

Проволока проходит через приемные штуцеры 16, между подающими и прижимными роликами в приемные трубки 17 распылительной головки.

Необходимое усилие прижима достигается при помощи регулировочного винта 21. Для прекращения подачи проволоки необходимо нажать на защелку 22, крышка при этом открывается и снимается давление прижимных роликов на проволоку.

В. Ротационный привод аппарата.

Ротационный привод представляет собой самостоятельный узел, который ввинчивается в корпус аппарата и одновременно служит его рукояткой.

Г. Распылительная головка (рис. 6.2).

Основанием распылительной головки является электроизоляционная панель 49, в центре которой запрессовано воздушное сопло 48.

На панели жестко закреплены токоподводящие шины 40, имеющие с внешней стороны по два рассверленных гнезда для размещения в них спиральных пружин 54. Для облегчения хода и устранения перекоса пружины снабжены направляющими гильзами 53.

К нижней части шин примыкают скобы 55, которые через имеющиеся в их основании прорези свободно закрепляются к шинам винтами 41.

Под действием спиральных пружин скобы 55 легко перемещаются относительно шин в горизонтальной плоскости и находятся в крайнем отжатом положении, т. е. максимально удалены от сопла. С внутренней стороны на скобы ставятся легкоъемные пластинчатые вкладыши 51, имеющие изогнутые по радиусу концы для направления проволоки.

Направляющие пластины 52 плотно прилегают к шинам и закрепляются на них винтами 44 и 45. Эти пластины имеют по всей длине внутренней вогнутой кромки паз, предназначенный для изгиба и направления проволоки.

Проталкиваемая механизмом подачи проволока входит в паз направляющих пластин и плотно прижимается к ним пластинчатыми вставками, которые вместе со скобами под действием пружин стремятся удалиться от воздушного сопла.

Положение точки пересечения проволок на оси воздушного сопла, и требуемый вылет концов проволоки достигаются поворотом регулирующих винтов 42.

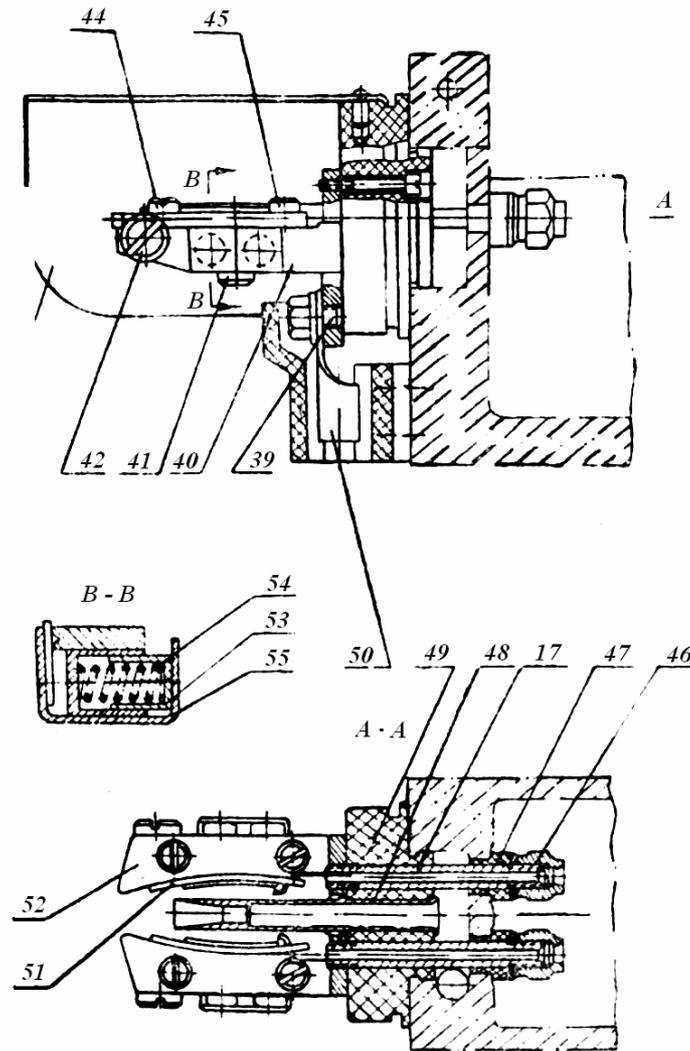


Рис. 6.2. Схема распылительной головки электрометаллизатора ЭМ-9

По мере выработки направляющих пластин 52 последние перемещаются в направлении воздушного сопла вокруг точки их закрепления (винты 45) с помощью регулировочных винтов 42, что позволяет значительно увеличить срок их службы.

Винты 44 входят в поперечные пазы направляющих пластин и в свободном (не завинченном) состоянии допускают перемещение этих пластин вокруг точек их закрепления.

Подвод тока к распылительной головке осуществляется по шинам, на основании которых имеются контактные болты 39, предназначенные для скрепления наконечников 50 с припаянными к ним электропроводами.

Крепление головки к корпусу аппарата осуществляется фасонными гайками 46, являющимися одновременно приемными воронками для проволоки.

Электроизоляционные втулки 47 ставятся с внутренней стороны передней стенки и служат для изоляции направляющих трубок 17 от корпуса аппарата.

Для защиты глаз от действия света электрической дуги распылительная головка прикрывается легко снимаемым защитным колпаком 43.

Порядок проведения работы

1. Изучить устройство установки ЭМ-9.
2. Подготовить аппарат к работе:
 - а) проверить наличие смазки в узлах аппарата;
 - б) произвести прикрепление резиноканевого шланга с внутренним диаметром 9 мм к сети сжатого воздуха, и произвести проверку отсутствия пропуска воздуха в месте крепления шланга;
 - в) подготавливается проволока и укладывается на вертушки таким образом, чтобы она легко разматывалась во время работы;
 - г) произвести регулировку распылительной головки (рекомендуемый угол скрещивания проволок 35 – 40°, а расстояние точки пересечения от конца воздушного сопла рекомендуется в пределах 15 – 20 мм).
3. На электрощитке аппарата установить переключатель на соответствующее напряжение, учитывая, что обычно работа на легкоплавких металлах (олове, свинце, цинке) производится на напряжении 20 – 25 В; для работы на более тугоплавких металлах (алюминии, латуни, меди, стали и др.) требуется напряжение 30 – 35 В.
4. Произвести напыление образцов.
5. Остановить аппарат в следующей последовательности:
 - а) посредством вращения до отказа регулировочного колпака в направлении отвертывания производятся остановка привода и прекращение подачи проволоки;
 - б) выключается электроток питания дуги;
 - в) перекрывается воздушный кран.
6. Занести данные в таблицу 6.1

Таблица 6.1

Материал образца	Состав проволоки	Расход газа, л/мин	Дистанция напыления, мм	Качество напыления

Содержание отчета

1. Описание физической сущности электродуговой металлизации.
2. Подобрать оптимальные режимы напыления.
3. Сделать выводы по выполненной работе.

Контрольные вопросы

1. Область применения электродуговой металлизации.
2. Опишите технологию подготовки поверхности под нанесения покрытий с помощью электродуговой металлизации.
3. Опишите технологию нанесения покрытий с помощью электродуговой металлизации.
4. Опишите конструкцию аппарата для электродуговой металлизации ЭМ-9.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

Изучение особенностей пайки электролизной газовой установкой типа «Лига»

Цель работы – изучить технологические особенности пайки; приобрести практические навыки работы на установке «Лига-31».

Оборудование и материалы:

1. Электролизная газовая установка «Лига-31».
2. Образцы для пайки.
3. Флюс и припой для высокотемпературной пайки.
4. Припой для низкотемпературной пайки.

Физическая сущность процесса

Общие положения

Пайка отличается от сварки тем, что основной металл не плавится, а нагревается лишь до температуры расплавления припоя, которая должна быть значительно ниже, чем температура плавления основного металла. Эта особенность процесса позволяет использовать пайку при соединении не только однородных, но и разнородных металлов с получением прочного и непроницаемого паяного шва.

Согласно ГОСТ 17325-79, различают два основных вида пайки: высокотемпературную и низкотемпературную. В первом случае применяют припои с температурой плавления выше 550 °С, а во втором – ниже 550 °С.

Припои

Припои различаются по их металлическим основам. Применяются припои на медной, оловянной, никелевой, алюминиевой, серебряной, золотой и другой основах. Изготавливают их в виде проволоки, литых прутков, фольги, порошка, пасты и т. п.

Выбор припоя зависит от паемого материала и от способа пайки. Для высокотемпературной пайки применяют медные, медно-цинковые, медно-фосфористые, никелевые, золотые, серебряные, алюминиевые припои.

В табл. 7.1 приведены сведения о химическом составе и некоторых свойствах медно-цинковых припоев. Эти припои выделяют среди припоев для высокотемпературной пайки сравнительно невысокой температурой плавления (они относятся к числу среднеплавких) и доступностью. Однако паяные соединения, выполненные с применением медно-цинковых припоев из-за высокого содержания цинка не пригодны для работы при ударных знакопеременных и изгибающихся нагрузках.

Таблица 7.1

Химический состав и свойства медно-цинковых припоев

Марка припоя	Содержание элементов, %				Температура полного расплавл. °С	Предел прочности, кгс/мм ²	Удлинение, %
	Cu	Zn	Pb	Fe			
ПМц 36	34-38	Остальное	<0.5	<0.1	825	3	0-1
ПМц 48	46-50	"	<0.5	<0.1	865	21	3
ПМц 54	52-56	"	<0.5	<0.1	880	35	5

Серебряные припои, кроме серебра, содержат медь, цинк, олово, марганец, сурьму, фосфор, кадмий, никель и свинец. Серебряные припои применяются для пайки любых черных и цветных металлов и их сочетаний, имеющих температуру плавления выше температуры плавления припоя. Этому условию не удовлетворяют алюминий, его сплавы и сплавы магния, которые поэтому не паяют серебряными припоями.

В зависимости от содержания серебра серебряные припои выпускают от марок ПСр 1 (1 % Ag) до ПСр 72 (72 % Ag). Температура плавления этих припоев от 235° (ПСр 1) до 860° (ПСр 50), т. е. среди них имеются припои легкоплавкие и среднеплавкие. Это означает, что некоторые серебряные припои могут быть использованы при низкотемпературной пайке.

Медно-фосфористые припои применяются только для пайки меди и латуни. В некоторых случаях, они могут заменять серебряные припои. Медно-фосфористые припои отличаются низкой стоимостью. При пайке меди медно-фосфористые припои не требуют применения флюса, так как являются самофлюсующими, однако для пайки этими припоями медных сплавов флюсы необходимы. По температуре плавления медно-фосфористые припои относятся к числу среднеплавких (табл. 7.2).

Таблица 7.2

Химический состав и температура плавления медно-фосфористых припоев (ГОСТ 4515-48)

Марка припоя	Содержание элементов, %			Температура полного расплавления, °С
	P	Cu	Примеси	
МФ1	8,5-10	Остальное	<0,4	850
МФ2	8,5-10	Остальное	<0,8	850
МФ3	7-8,5	Остальное	<1,0	860

Припои для низкотемпературной газопламенной пайки в основном состоят из олова и свинца. Добавка в состав оловянно-свинцовых припоев в количестве до 6 % увеличивает прочность припоев. Серебряные припои с небольшим содержанием серебра и значительным олова и свинца, имею-

щие температуру плавления ниже 450°, также можно отнести к припоям для низкотемпературной пайки.

По температуре плавления оловянно-свинцовые припои относятся к числу легкоплавких (табл. 7.3).

Таблица 7.3

Химический состав и температура плавления оловянно-свинцовых припоев (ГОСТ 1499-70)

Марка припоя	Содержание элементов, %			t полн. расплавления, °С
	Sn	Sb	Pb	
ПОС 90	89-91	0.05	Остальное	220
ПОС 61	60-62	0.05	"	190
ПОС 40	39-41	0.05	"	238
ПОССу 50-05	49-51	0.2-0.5	"	216
ПОССу 30-0.5	29-31	0.2-0.5	"	245

Общие принципы технологии пайки

Технология пайки включает комплекс последовательно выполняемых операций, основными из которых являются подготовка поверхности соединяемых деталей, сборка, пайка и обработка деталей после пайки. Этот комплекс операций в том или ином объеме имеет место при всех способах пайки.

Независимо от применяемого способа пайки для получения качественных паяных соединений требуется:

1. Тщательная очистка соединяемых поверхностей деталей перед пайкой от загрязнений и окисных пленок. Перед сборкой под пайку детали очищают от консервирующей смазки, загрязнений, краски, окалины, следов коррозии. Загрязнения жирового происхождения удаляют с поверхности деталей обезжириванием путем погружения деталей в водные растворы щелочей или в органические растворители, последующей промывки и сушки. Окисные пленки с поверхности деталей удаляют механическими или химическими средствами.

2. Соблюдение при сборке деталей под пайку установленных соединительных зазоров. При любых способах пайки целесообразно закреплять элементы паяемого изделия в приспособлениях или фиксировать их с помощью кернения, развальцовки, точечной сварки и др. способами.

3. Удаление окисной пленки с соединяемых поверхностей основного металла и припоя в процессе пайки. Для получения паяного соединения недостаточно очистить соединяемые поверхности металлов перед процессом пайки. Необходимо также обеспечить надежные условия удаления окисной пленки непосредственно в процессе пайки.

4. Равномерный нагрев соединяемых поверхностей деталей до температуры пайки.

Устройство и принцип работы установки

Электролизная газовая установка «Лига-31» предназначена для выработки смеси газов (водород и кислород), пламя которых является источником нагрева до 2600 градусов для высоко- и низкотемпературной пайки, сварки, резки металлов и других материалов (стекла, керамики и т. д.).

Внешний вид установки приведён на рис. 7.1.

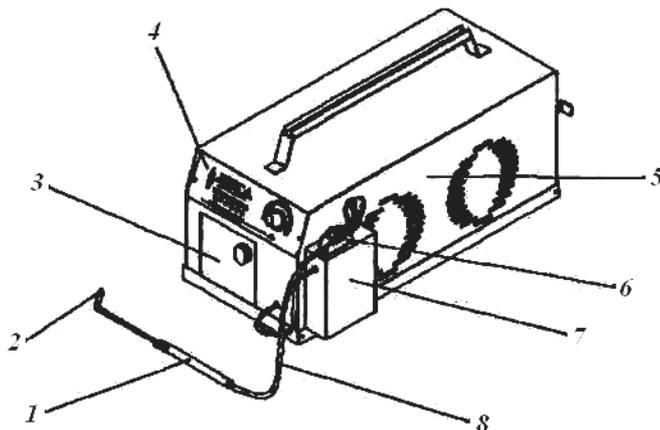


Рис. 7.1. Внешний вид установки «Лига-31»:

- 1 – горелка с огнепреградителем; 2 – сменное сопло; 3 – водяной затвор;
4 – силовой блок; 5 – электролизёр; 6 – регулятор охладителя-обогапителя;
7 – охладитель-обогапитель; 8 – шланги.

При протекании электрического тока через воду, выделяются газообразные водород и кислород. Для увеличения КПД процесса электролиза в воду добавляют щёлочь, которая практически не расходуется в процессе выработки газовой смеси. Раствор щёлочи в воде называется электролитом.

Расходуемым материалом в установке является вода, поэтому во время работы уровень электролита в электролизере постоянно понижается. При достижении уровнем минимального значения срабатывает датчик, который подаёт прерывистый звуковой сигнал и блокирует выработку газа.

Произведённая в электролизёре (5) водородно-кислородная газовая смесь проходит через водяной затвор (барботер) (3), который играет роль огнепреградителя при обратном ударе (воспламенение смеси в газовом тракте, возникающее при выключении установки или в аварийных ситуациях).

Выработанная в процессе электролиза газовая смесь насыщена парами воды. Для того чтобы от них избавиться, газовая смесь проходит через охладитель-обогапитель (7), в котором собирается избыточная влага. Кроме того, охладитель-обогапитель (7) используется для того, чтобы иметь возможность менять состав пламени, т. е. соотношение горючего и окислителя. Это устройство позволяет с помощью регулятора (6) вводить в газовую

смесь пары летучих углеводородов (бензол, бензин и т. п.). Полученная газовая смесь по шлангам (8) поступает в горелку (1), собранную вместе с дополнительным «сухим» огнепреградителем. Количество произведённой газовой смеси регулируется изменением тока через электролизёр (5). Если производительность установки не соответствует диаметру сопла горелки, или засорены газовые магистрали, то внутри электролизёра увеличивается давление. При превышении давления над 0,6 атм. срабатывает аварийный датчик давления, который, воздействуя на силовой блок (4), выключает ток через электролизёр (5) и подаёт непрерывный звуковой сигнал.

Основные особенности кислородо-водородного пламени с углеводородными добавками

1. Более низкая теплотворная способность и температура по сравнению с ацетилено-кислородным пламенем.
2. Невозможность изменять соотношение основных компонентов (окислительно-восстановительных характеристик) пламени кислорода и водорода за счет электролизного блока установки.
3. Изменение окислительно-восстановительного характера пламени достигается за счет насыщения смеси кислорода и водорода парами углеводородов (бензин, бензол, гексан).
4. Соотношение смеси газов в пламени отличается количественно от соотношения газов в пламени кислородо-ацетиленовой или кислородо-пропановой горелки (более H_2O и меньше CO_2).
5. Восстановительный потенциал кислородо-ацетиленового пламени больше по сравнению с кислородо-водородным пламенем.

Порядок проведения работы

1. Ручку регулятора тока, расположенную на лицевой панели блока управления, вывести в крайнее левое положение (против часовой стрелки).
2. Подсоединить устройство к сети. При этом заработают вентиляторы и на 6 – 8 секунд загорятся крайние светодиодные индикаторы, что свидетельствует о подготовке установки к работе (при этом возможна подача кратковременного звукового сигнала). После того, как светодиоды погаснут, ручку регулятора тока плавно повернуть по часовой стрелке до загорания двух-трёх светодиодных индикаторов.
3. Через водяной затвор должны пойти пузырьки газа, хорошо видимые в прозрачном окне с лицевой стороны электролизёра. Уровень жидкости в водяном затворе перед включением установки может быть низким.

После включения установки этот уровень должен подняться до необходимого: на 5 – 10 мм ниже края заливного отверстия.

4. Произвести низкотемпературную пайку образцов.
5. Произвести высокотемпературную пайку образцов.
6. По окончании работы погасить горелку следует резко сдуть пламя (как при гашении свечи). После этого выключить электролизёр.
7. Занести данные в таблицу 7.4

Таблица 7.4

Материал образца	Состав припоя	Флюс	Температура пайки	Качество пайки

Содержание отчета

1. Описание физической сущности и схемы процесса электролизной газовой установки.
2. Основные особенности кислородо-водородного пламени с углеводородными добавками.
3. Технологические особенности пайки.

Контрольные вопросы

1. В чем различие между пайкой и сваркой?
2. Общие принципы технологии пайки.
3. Область применения пайки.
4. Принцип работы установки «Лига-31».

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

Тепловая сварка пластмасс нагретым инструментом

Цель работы – изучить физическую сущность процесса тепловой сварки пластмасс и технологические возможности способа. Ознакомиться с устройством оборудования и подобрать оптимальный режим сварки. Проанализировать конструкцию установки, выявить ее недостатки, наметить пути их устранения.

Физическая сущность процесса

Пластмассами принято называть многокомпонентные системы, состоящие из полимера, который является основным компонентом, а также упрочняющих и красящих добавок. Полимеры – это высокомолекулярные вещества, макромолекулы которых состоят из большого числа повторяющихся малых структурных элементов-звеньев, являющихся мономерами. Полимеры могут иметь естественное происхождение (целлюлоза, натуральный каучук) и искусственное (полиэтилен, полистирол, полиамиды). Добавки, которые вводят в смеси при изготовлении пластмасс, служат для придания им необходимых технологических и эксплуатационных свойств. Пластмассы являются неэлектропроводными материалами.

Все виды существующих пластмасс в зависимости от их реакции на температуру нагрева подразделяют на две группы:

1) термореактивные пластмассы (реактопласты), которые при нагреве теряют свои первоначальные свойства. К таким пластмассам относятся текстолит, бакелит, эбонит и др. Они не свариваются, и при необходимости отдельные части изделия соединяются либо склеиванием, либо механическими способами;

2) термопластичные пластмассы (термопласты), которые при нагреве не изменяют своих свойств и могут многократно нагреваться до температуры вязкотекучего состояния. К таким пластмассам относятся полиэтилен, полипропилен, полистирол, полиамид и т. д. Отдельные части изделий из таких пластмасс можно соединять сваркой.

Полиэтилен является одним из распространенных полимеров, из него изготавливают пленки, листы, емкости, трубы, контейнеры для упаковки различных продуктов и т. п. В зависимости от способа производства различают полиэтилен высокого давления (ПВД) и полиэтилен низкого давления (ПНД).

При сварке пластмасс неразъемное соединение образуется за счет доведения соединяемых поверхностей до вязкотекучего состояния и их взаимного перемешивания. При сварке давлением это достигается за счет совместной пластической деформации. В результате сварки частично или полностью исчезает граница раздела между соединяемыми поверхностями.

Прочность сварного соединения – сварного шва, – а также другие физико-механические свойства приближаются к прочности основного материала, а иногда становятся равными ей.

При сварке термопластов, так же как и при сварке металлов, в зоне сваривания протекают следующие процессы: подвод и преобразование энергии, обеспечивающей активацию свариваемых поверхностей, взаимодействие этих поверхностей при контакте между собой, формирование структуры в зоне сварки.

В зависимости от подвода тепловой энергии в зону соединения различают два способа сварки пластмасс.

1. Тепловая энергия, необходимая для нагрева, выделяется внутри термопласта путем преобразования механической, электрической и других видов энергии в тепловую. К этому способу относятся: ультразвуковая сварка, сварка токами высокой частоты, сварка с помощью инфракрасного излучения, сварка трением и т. д.

2. Тепловая энергия, необходимая для разогрева свариваемых поверхностей, вводится в зону соединения извне. Этот способ включает в себя сварку нагретым инструментом, сварку газовыми теплоносителями, сварку экструдированной присадкой, лазерную сварку и т. д.

В настоящей работе рассмотрен один из наиболее перспективных способов – сварка пластмасс нагретым инструментом, выполняемая на промышленной установке для сварки пластмассовых труб.

Сварка пластмасс нагретым инструментом

Сварка нагретым инструментом – сварка давлением – универсальный способ соединения термопластов, сущность которого заключается в том, что соединяемые детали или заготовки, контактируя со специальным, нагретым до определенной температуры (200... 240 °С) инструментом, разогреваются в месте соединения до температуры вязкотекучего состояния и под воздействием давления, прикладываемого к свариваемым заготовкам, свариваются.

Источником нагрева является специальный нагреватель – инструмент, передающий тепловую энергию свариваемым заготовкам при контактировании с ними. После достижения необходимой температуры инструмент удаляется, а соединяемые поверхности приводятся в соприкосновение и сдавливаются внешним усилием.

Основными параметрами режима сварки, от которых зависит качество соединения, являются: температура нагревателя, продолжительность нагрева, давление, которое должно быть достаточным, чтобы обеспечить плотное соприкосновение свариваемых поверхностей и вытеснить газы из зоны соединения (из зоны сварного шва). Давление при сварке термопла-

стов составляет 0,1... 0,3 МПа. Необходимая температура нагревателя определяется свойствами свариваемого материала и должна быть такой, чтобы свариваемый материал перешел в вязкотекучее состояние за 2... 10 с. Рекомендуемые температуры нагревателя для сварки стыковых соединений различных пластмасс приведены в табл. 8.1.

Устройство установки для сварки труб нагретым инструментом. Установка предназначена для сварки труб из полиэтилена низкого (НД) и высокого давления (ВД), а также из полипропилена.

Таблица 8.1

Материал	Поливинилхлорид	ПВД	ПНД	Полипропилен	Полиметилметакрилат	Полистирол	Полиамид
Температура, °С	200 – 220	180 – 220	150 – 170	110 – 160	180	160 – 180	220 – 260

Установка состоит из неподвижного и подвижного корпусов, ручного привода для осуществления давления при сварке. Для создания заданного усилия сжатия в неподвижном корпусе расположены пружины и упорная втулка. Отсчет усилия осуществляют по специальной шкале. В верхней части неподвижного корпуса расположен сменный хомут, который служит для закрепления и центрирования свариваемых труб. Для выравнивания торцов свариваемых заготовок используют двухстороннюю фрезу с храповым механизмом. Для нагрева торцов труб используют специальный нагреватель.

Техническая характеристика установки

Диаметр свариваемых труб, мм.....	16...110
Привод.....	Ручной
Развиваемое усилие сжатия, Н (кгс)	800 (80)
Усилие па рукоятке при максимальном усиллии сжатия, Н (кгс)	80 (8)
Напряжение питания, В.....	220
Частота тона нагревателя, Гц.....	50
Потребляемая мощность, кВт.....	1
Диапазон регулирования температуры, °С.....	200, 220, 240

Принцип работы установки

Свариваемые трубы 3 закрепляют в хомутах с помощью зажимного устройства 1 (рис. 8.1 а). Фрезу устанавливают с помощью струбцины на направляющую, расположенную в неподвижном корпусе. С помощью фрезы проводят торцовку труб, после чего фрезу убирают из зоны сварки. Для нагрева торцов заготовок на направляющую устанавливают и затем фиксируют разогретый нагреватель 2. Вращением маховика торцы заготовок подводят к нагревателю. Продолжая вращать маховик, задают необходимое усилие для нагрева, отсчитывая его по шкале усилия, расположенной на установке. После выдержки времени нагрева заготовок и образования

необходимого грата нагреватель убирают. Сварку проводят путем непосредственного соприкосновения торцов заготовок сразу после их нагрева. Торцы сближаются за счет вращения маховика. По шкале задают необходимое усилие для осуществления совместной пластической деформации. Трубы выдерживают в сжатом состоянии некоторое время, после чего сваренную трубу снимают с установки (рис. 8.1 б).

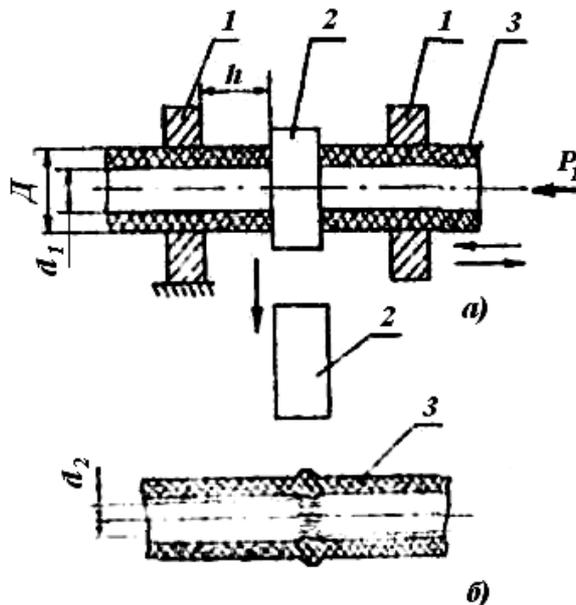


Рис. 8.1. Принципиальная схема сварки: а – сварка труб нагретым инструментом; б – сваренная труба; 1 – зажимное устройство; 2 – нагреватель; 3 – свариваемая труба; h – расстояние от зажимного устройства до нагревателя; D – наружный диаметр трубы; d_1 – внутренний диаметр трубы; d_2 – внутренний диаметр сварного шва; P_1 – усилие сжатия

Задание

1. Изучить сущность процесса и ознакомиться с конструкцией и работой установки для контактно-тепловой сварки термопластичных труб.
2. Подготовить установку к сварке.
3. Осуществить сварку в следующем порядке:
 - а) вращая маховик, подвести торцы заготовок к ножам дисков фрезы и осуществить торцовку труб на глубину не более 2 мм;
 - б) отвести вращением маховика торцы заготовок от ножей фрезы;
 - в) убрать фрезу из рабочей зоны;
 - г) установить в рабочую зону нагреватель;
 - д) подвести, вращая маховик, торцы заготовок к нагревателю и далее, продолжая вращать маховик, задать усилие нагрева;

е) после окончания нагрева удалить нагреватель из рабочей зоны и резко свести торцы заготовок до соприкосновения между собой, далее, вращая маховик, задать усилие сжатия, рассчитанное по формуле:

$$P = K \cdot S \cdot (d - S), Н, \quad (8.1)$$

где S – толщина стенки трубы, мм;

d – диаметр трубы, мм;

K – коэффициент удельного давления, кгс/мм.

Значения K выбрать по таблице, расположенной на установке.

ж) выдержать заготовку с заданным усилием;

з) удалить готовое изделие из хомутов.

4. Определить качество сварного соединения и записать в табл. 8.2 основные параметры режима сварки.

5. Определить оптимальную степень деформации по формуле:

$$\varepsilon = \frac{2h - H}{2h} \cdot 100 \%, \quad (8.2)$$

где h – вылет одной заготовки (расстояние от торца трубы до хомута), мм;

H – расстояние между хомутами-зажимами после окончания сварки, мм.

Таблица 8.2

Материал трубы	Диаметр трубы, мм	Толщина стенки, мм	Вылет, мм	Усилие при сварке, Н	Время сварки, с	Степень деформации, %

Содержание отчета

1. Описание физической сущности образования соединения при сварке термопластичных пластмасс нагретым инструментом.

2. Схема процесса сварки.

3. Описание установки для сварки труб нагретым инструментом.

4. Характеристика свариваемых материалов.

5. Таблица, заполненная полученными результатами.

Контрольные вопросы

1. В чем сущность процесса сварки пластмасс?

2. К какому методу сварки относится сварка пластмасс нагретым инструментом?

3. От каких параметров режима сварки зависит получение качественного соединения?

4. Какие полимерные материалы можно сваривать нагретым инструментом?

5. Чем отличается сварка пластмасс нагретым инструментом от контактной стыковой сварки металлов?

РЕЙТИНГОВЫЙ КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

Система контроля знаний студентов включает следующие направления оценки успешности обучения:

1-е направление – оценка отношения студента к выполнению своих обязанностей на этапе изучения дисциплины;

2-е направление – текущий контроль успешности изучения дисциплины;

3-е направление – итоговый контроль успешности изучения дисциплины.

Для оценки успешности курса «Специальные способы сварки и пайка» по первому направлению выделяется общее количество баллов, равное 200, которое распределяется следующим образом:

1-е направление – 200 баллов		
Раздел I		
4 ч лекций x 2 балл	8 баллов	За 100% посещение лекций
Баллы за успешное выполнение предаттестационных заданий	2 балла	Самостоятельная работа по тематике лекций и лаб. работ
Итого	10 баллов	
Раздел II		
22 ч лекций x 2 балл	44 балла	За 100 % посещение лекций
2 ч. лаб. работы x 2 балл	4 балла	За 100 % посещение лаб. работ
Баллы за успешное выполнение предаттестационных заданий	15 баллов	Самостоятельная работа по тематике лекций и лаб. работ
Итого	63 балла	
Раздел III		
20 ч лекций x 2 балл	40 баллов	За 100 % посещение лекций
6 ч. лаб. работы x 2 балл	12 баллов	За 100 % посещение лаб. работ
Баллы за успешное выполнение предаттестационных заданий	14 баллов	Самостоятельная работа по тематике лекций и лаб. работ
Итого	66 баллов	
Раздел IV		
10 ч лекций x 2 балл	20 баллов	За 100 % посещение лекций
4 ч. лаб. работы x 2 балл	8 баллов	За 100 % посещение лаб. работ
Баллы за успешное выполнение предаттестационных заданий	5 баллов	Самостоятельная работа по тематике лекций и лаб. работ
Итого	33 балла	
Раздел V		
4 ч лекций x 2 балл	20 баллов	За 100 % посещение лекций
2 ч. лаб. работы x 2 балл	8 баллов	За 100 % посещение лаб. работ
Баллы за успешное выполнение предаттестационных заданий	2 балла	Самостоятельная работа по тематике лекций и лаб. работ
Итого	14 балла	
Раздел VI		
4 ч лекций x 2 балл	8 баллов	За 100 % посещение лекций
2 ч. лаб. работы x 2 балл	4 баллов	За 100 % посещение лаб. работ
Баллы за успешное выполнение предаттестационных заданий	2 балла	Самостоятельная работа по тематике лекций и лаб. работ
Итого	14 баллов	
Общий итог	200 баллов	

Для оценки успешности изучения дисциплины по второму направлению выделяется общее количество баллов, равное 100, которое распределяется следующим образом:

2-е направление – 100 баллов		
Успешная защита выполненных лабораторных работ	100 баллов	За своевременную защиту 100 % лаб. работ
Итого	100 баллов	

Для оценки успешности изучения дисциплины по третьему направлению выделяется общее количество баллов, равное 300.

3-е направление – 300 баллов	
Устный итоговый экзамен по дисциплине	300 баллов
Итого	300 баллов

Для оценки успешности изучения студентом дисциплины «Специальные процессы сварки и пайка» предлагается руководствоваться следующими критериями:

Уровень (рейтинг)	Количество баллов
Минимальный	360
Средний	420
Хороший	480
Высокий	540
Превосходной	600

Если после изучения дисциплины в семестре рейтинг студента $R < 60\%$ ($R < 360$ баллов), то студент считается не выполнившим учебный план по данной дисциплине и не допускается к сдаче экзамена. Для допуска к экзамену студенту необходимо набрать недостающие баллы (например, по причине пропуска занятий, невыполненных или незащищенных лабораторных работ и т. д.). Это может быть тестирование, опрос (письменный, устный) по темам пропущенных занятий, выполнить на «удовлетворительно» необходимый минимум учебных работ, который не был выполнен в семестре.

Если после изучения дисциплины в семестре и сдачи экзамена рейтинг студента удовлетворяет условию $60\% \leq R < 70\%$ ($360 \leq R < 420$), то это соответствует минимальному уровню и студент считается выполнившим учебный план, допускается к экзамену. Однако данный уровень показывает, что у студента низкий рейтинг по дисциплине.

Если после изучения дисциплины в семестре и сдачи экзамена рейтинг студента удовлетворяет условию $70\% \leq R < 80\%$ ($420 \leq R < 480$), то это соответствует среднему уровню.

Аналогично, если после изучения дисциплины в семестре и сдачи экзамена рейтинг студента удовлетворяет условию $80\% \leq R < 90\%$ ($480 \leq R < 540$), то это хороший результат. Если в результате изучения дисциплины в семестре и сдачи экзамена рейтинг студента удовлетворяет условию $90\% \leq R < 100\%$ ($540 \leq R < 600$), то такой рейтинг называется высоким.

Достижение 600 баллов свидетельствует о превосходном результате.

Литература

Основная:

1. Николаев, Г.А.. Специальные методы сварки: учеб. пособие для студентов вузов. / Г.А. Николаев, Н.А. Ольшанский – М.: Машиностроение, 1975. – 232 с.
2. Технология конструкционных материалов: учеб. для студентов машиностроительных специальностей вузов. / А.М. Дальский [и др.] – М.: Машиностроение, 2005. – 592 с.
3. Сварка в машиностроении: справочник: в 4 т. / Редкол.: Г.А. Николаев (пред.) [и др.]. – М.: Машиностроение, 1978 – Т. 1. / Под ред. Н.А. Ольшанского. 1978. – 504 с.
4. Сварка в машиностроении: справочник: в 4 т. / Редкол.: Г.А. Николаев (пред.) [и др.]. – М.: Машиностроение, 1979 – Т. 4 / Под ред. Ю.Н.Зорина. 1979. – 512 с.
5. Теория и практика нанесения защитных покрытий. / П.А. Витязь [и др.] – Минск: Беларуская навука, 1998. – 583 с.
6. Дорожкин, Н.Н. Тонкослойное электрошлаковое упрочнение / Н.Н. Дорожкин, А.В. Дудан. – Минск: ИНДМАШ АН БССР, 1985. – 32 с.

Дополнительная:

1. Лашко, С.В. Технология пайки изделий в машиностроении / С.В. Лашко, Е.И. Врублевский. – М.: Машиностроение, 1993 – 464 с.
2. Справочник по пайке. / Под ред. И.Е. Петрунина. – М.: Машиностроение, 2003. – 480 с.
3. Неровный, В.М., Проектирование вакуумных систем сварочных установок: учеб. пособие. / В.М. Неровный, В.И. Гирш. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 40 с.
4. Теория, технология и оборудование диффузионной сварки: учеб. для вузов / В.А. Бачин [и др.]. – М.: Машиностроение, 1991. – 352 с.
5. Сварка. Резка. Контроль: справочник: в 2 т. печ. / Под общ. ред. Н.П. Алешина, Г.Г. Чернышова. – М.: Машиностроение, 2004. – Т. 1. – 624 с.
6. Сварка. Резка. Контроль: справочник: в 2 т. печ. / Под общ. ред. Н.П. Алешина, Г.Г. Чернышова. – М.: Машиностроение, 2004. – Т. 2. – 480 с.
7. Сварка в машиностроении: справочник: в 4 т. / Редкол.: Г.А. Николаев (пред.) [и др.] – М.: Машиностроение, 1978 – Т. 2. / Под ред. А.И. Акулова. – М.: Машиностроение, 1978. – 462 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Учебная программа	4
Раздел 1. Характеристика специальных способов сварки и пайки	
1. Введение в дисциплину	11
2. Виды специальных способов сварки	17
Раздел 2. Специальные способы сварки давлением	
3. Холодная сварка металлов	25
4. Контактная сварка и ее разновидности	31
5. Сварка аккумуляторной энергией	42
6. Сварка металлов трением	44
7. Ультразвуковая сварка	56
8. Сварка взрывом	65
9. Диффузионная сварка	71
10. Высокочастотная сварка	83
Раздел 3. Специальные способы сварки плавлением	
11. Дуговая сварка в камерах с контролируемой атмосферой	88
12. Электронно-лучевая сварка	93
13. Сварка световым лучом	108
14. Плазменная сварка и обработка металлов	117
15. Сварка и резка под водой	125
16. Атомно-водородная сварка	136
17. Термитная сварка	141
Раздел 4. Нанесение защитных покрытий	
18. Наплавка металлов	148
19. Электролитическое и газопламенное напыление	179
Раздел 5. Пайка металлов	
20. Пайка металлов	195
Раздел 6. Сварка пластмасс	
21. Сварка пластмасс	210
Лабораторная работа № 1	224
Лабораторная работа № 2	229
Лабораторная работа № 3	234
Лабораторная работа № 4	239
Лабораторная работа № 5	250
Лабораторная работа № 6	256
Лабораторная работа № 7	265
Лабораторная работа № 8	271
Рейтинговый контроль знаний	276
Литература	278

Учебное издание

ДУДАН Александр Витальевич
ДЕНИСЕНКО Сергей Федорович

СПЕЦИАЛЬНЫЕ СПОСОБЫ СВАРКИ, ПАЙКА

Учебно-методический комплекс
для студентов специальности 1-36 01 06
«Оборудование и технология сварочного производства»
и слушателей ИПК УО «ПГУ» специальности 1-36 01 72
«Оборудование и технология сварочного производства»

Редактор *И. Н. Безборщя*
Дизайн обложки *В. А. Виноградовой*

Подписано в печать 06.10.10. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 16,24. Уч.-изд. л. 16,08. Тираж 45 экз. Заказ 1511.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования «Полоцкий государственный университет».

ЛИ № 02330/0548568 от 26.06.2009 ЛП № 02330/0494256 от 27.05.2009

Ул. Блохина, 29, 211440, г. Новополоцк.