

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет»

Ю.М. Тыткин, Д.Н. Трушников, В.Я. Беленький

## **СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ СВАРКИ**

Утверждено  
Редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебного пособия

Издательство  
Пермского национального исследовательского  
политехнического университета  
2012

УДК 621.791

Т93

Рецензенты:

канд. воен. наук *Д.М. Цимберов*

(Пермский военный институт внутренних войск МВД России);

д-р техн. наук, профессор *Ю.Д. Щицын*

(Пермский национальный исследовательский политехнический университет)

**Тыткин, Ю.М.**

Т93 Специальные методы сварки : учеб. пособие / Ю.М. Тыткин, Д.Н. Трушников, В.Я. Беленький. – Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012.– 86 с.

ISBN 978-5-398-00821-0

Приведены описание, технические возможности и области применения специальных методов сварки: электронно-лучевой, лазерной, ультразвуковой, диффузионной, а также сварки трением и сварки взрывом. Описано оборудование и технология указанных методов сварки.

Предназначено для магистров, обучающихся по направлению 150400 «Технологические машины и оборудование» специализации 551806 «Машины и технология сварочного производства», и студентов специальности 150202 «Оборудование и технология сварочного производства».

УДК 621.791

Работа выполнена при финансовой поддержке  
Министерства образования Пермского края.

ISBN 978-5-398-00821-0

© ПНИПУ, 2012

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Ультразвуковая сварка .....	4
1.1. Общие сведения об ультразвуковой сварке .....	4
1.2. Технология УЗС.....	7
1.3. Оборудование для УЗС .....	8
1.4. Промышленное применение УЗС .....	8
1.5. Ультразвуковая сварка пластмасс .....	9
2. Лазерная сварка.....	14
2.1. Общие сведения о лазерной сварке.....	14
2.2. Технология лазерной сварки .....	22
2.3. Оборудование для лазерной сварки .....	26
3. Электронно-лучевая сварка.....	31
3.1. Общие сведения об электронно-лучевой сварке .....	31
3.2. Нагрев металла при ЭЛС .....	33
3.3. Формирование канала проплавления при ЭЛС .....	35
3.4. Специфические дефекты сварных швов при ЭЛС .....	37
3.5. Технология ЭЛС .....	38
3.6. Оборудование для ЭЛС .....	39
4. Диффузионная сварка .....	44
4.1. Общие сведения о диффузионной сварке .....	44
4.2. Технология ДС .....	47
4.3. Технологическая оснастка и оборудование .....	53
4.4. Промышленное применение ДС.....	59
4.5. Контроль качества сварного соединения при ДС .....	61
5. Сварка трением .....	62
5.1. Общие сведения о сварке трением.....	62
5.2. Технология сварки трением .....	68
5.3. Оборудование для СТ .....	72
5.4. Промышленное применение СТ .....	73
5.5. Контроль качества сварного соединения при СТ .....	73
6. Сварка взрывом .....	75
6.1. Общие сведения о сварке взрывом.....	75
6.2. Технология сварки взрывом .....	79
6.3. Оборудование и оснастка для СВ.....	82
6.4. Промышленное применение СВ.....	83
6.5. Контроль качества сварного соединения при СВ .....	84
Список рекомендуемой литературы.....	85

# 1. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ СВАРКА

## 1.1. Общие сведения об ультразвуковой сварке

Ультразвуковая сварка (УЗС) является одним из современных способов соединения металлов в твердом состоянии.

Возможность применения ультразвука для получения неразъемного соединения была обнаружена при исследовании особенностей контактной сварки с ультразвуковой очисткой соединяемых поверхностей.

Наиболее интенсивное развитие этот процесс получил в последние 30–40 лет. К настоящему времени в нашей стране и за рубежом разработаны оборудование и технология УЗС металлов, которые успешно применяются в промышленности.

### *1.1.1. Определение и основные схемы процесса УЗС*

Ультразвуковая сварка – сварка давлением, осуществляемая при воздействии ультразвуковых колебаний. Неразъемное соединение при УЗС металлов получают в процессе сжатия соединяемых элементов с относительно небольшим усилием (десятые доли или единицы ньютона при соединении элементов микросхем и полупроводниковых приборов и не более  $10^4$  Н при сварке относительно толстых листов) при одновременном воздействии на зону контакта механических колебаний с частотой 15...80 кГц.

Сварку с помощью ультразвука осуществляют на специальных машинах, состоящих из источника генерации высокочастотных (ультразвуковых) электромагнитных колебаний, механической колебательной системы, аппаратуры управления сварочным циклом и привода сварочного усилия.

Преобразование электромагнитных колебаний в механические и введение последних в зону сварки обеспечивается в этих машинах механической колебательной системой. Типовые колебательные системы для УЗС металлов приведены на рис. 1.1.

Основным звеном колебательных систем является преобразователь  $I$ , который изготавливают из магнитоэлектрических или пьезоэлектрических материалов (никель, титанат бария, ниобат свинца и др.). Преобра-

зователь является источником механических колебаний. Волноводное звено 2 осуществляет передачу энергии к сварочному наконечнику и обеспечивает увеличение амплитуды колебаний по сравнению с амплитудой исходных волн преобразователя, а также трансформирует сопротивление нагрузки и концентрирует энергию в заданном участке свариваемых деталей 5. Акустическая развязка 3 от корпуса машины позволяет практически всю энергию механических колебаний трансформировать и концентрировать в зоне контакта. Сварочный наконечник 4 является согласующим волноводным звеном между нагрузкой и колебательной системой. Он определяет площадь и объем непосредственного источника ультразвуковых механических колебаний в зоне сварки.

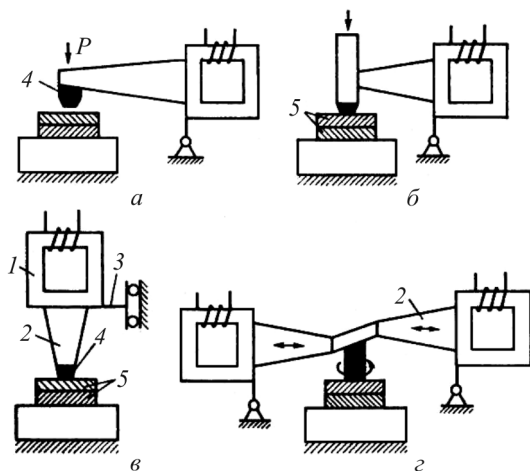


Рис. 1.1. Схема типовых колебательных систем для УЗС металлов:  
*а* – продольная; *б* – продольно-поперечная; *в* – продольно-вертикальная;  
*г* – крутильная ( $P$  – давление)

В зависимости от формы сварочного наконечника колебательной системы УЗС металлов может быть точечной, шовной или кольцевой.

### 1.1.2. Физические основы УЗС

При УЗС необходимые условия для образования соединения создаются в результате наличия механических колебаний в зоне контакта соединяемых элементов. Энергия вибрации создает сложные напряжения растяжения, сжатия и среза. При превышении предела упруго-

сти соединяемых металлов происходит пластическая деформация в зоне их контактирования. В результате пластической деформации и диспергирующего действия ультразвука происходит разрушение и удаление поверхностных пленок различного происхождения, а также образование сварного соединения. При этом отмечается резкая интенсификация процесса образования соединения в результате ультразвукового воздействия на свариваемые материалы.

Температура нагрева в зоне контакта обычно не превышает 0,3...0,5 от температуры плавления соединяемых металлов. Повышение температуры не является определяющим фактором в образовании сварного соединения и не оказывает значительного воздействия на свариваемые металлы. При УЗС происходит лишь незначительное изменение структуры и свойств свариваемых металлов.

### 1.1.3. Технологические возможности УЗС

УЗС позволяет соединять разные элементы изделий толщиной 0,005...3,0 мм или диаметром 0,01...0,5 мм. При приварке тонких листов и фольги к деталям толщина последних практически не ограничивается. Разнотолщинность свариваемых деталей при УЗС может достигать 1:100. На рис. 1.2 представлены наиболее распространенные для ультразвуковой сварки металлов типы сварных соединений.

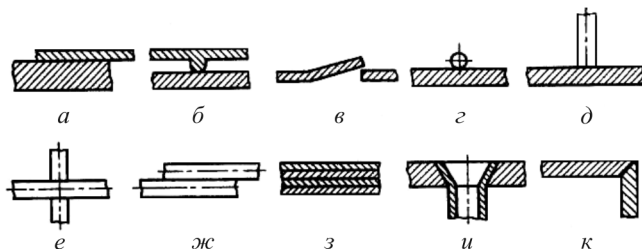


Рис. 1.2. Основные типы сварных соединений металлов: *a* – внахлестку; *б* – по рельефам; *в* – с раздавливанием кромок; *г* – параллельное круглого элемента с плоским; *д* – встык круглого элемента с плоским; *е* – крестообразное круглых элементов; *ж* – параллельное круглых элементов; *з* – многослойных деталей и пленок; *и*, *к* – угловое

С помощью ультразвука можно сваривать металлы и сплавы как между собой (в однородном или разнородном сочетании), так и с некоторыми неметаллическими материалами. Свариваемость металла

зависит от его твердости и кристаллической структуры. С увеличением твердости свариваемость ухудшается. При сварке металла с решетками объемно-центрированной кубической, гранецентрированной кубической и гексагональной свариваемость ухудшается в пропорции 24:8:6. Это обусловлено тем, что металлы с разной кристаллической структурой обладают неодинаковой способностью проводить ультразвуковые колебания.

## 1.2. Технология УЗС

Схема типового технологического процесса при УЗС металлов представляет собой комплекс последовательно выполняемых операций, основными из которых являются: подготовка свариваемых поверхностей, сборка узлов, прихватка, сварка и правка. Объем работ по каждой операции определяется особенностями технологии изготовления конкретных изделий. Прихватка при ограниченном числе сварных точек может не выполняться.

Влияние поверхностных пленок на прочность соединений, выполненных УЗС, невелико, поэтому считается, что при УЗС металлов можно получать сварные соединения с высокими эксплуатационными характеристиками без предварительной обработки соединяемых поверхностей. Вместе с тем в ряде случаев удаление поверхностных пленок с соединяемых поверхностей является целесообразным, так как они не только снижают возможность образования сварного соединения, но и исключают получение технологического эффекта.

Основными технологическими параметрами режима УЗС металлов являются амплитуда колебаний сварочного наконечника  $\xi_{св}$ , сварочное усилие  $F_{св}$  и время сварки  $t_{св}$ .

Амплитуда колебаний сварочного наконечника является важнейшим параметром режима сварки, влияющим на создание необходимых условий для удаления поверхностных пленок, нагрев, расположение и размеры зоны пластической деформации свариваемого металла. В каждом конкретном случае  $\xi_{св}$  назначают в зависимости от наличия оксидной пленки и ее толщины, а также от свойств (предела текучести и твердости) и толщины свариваемого металла. При этом она растет пропорционально пределу текучести, твердости и толщине свариваемого металла. Величина  $\xi_{св}$  обычно находится в пределах от 0,5 до 50 мкм.

Сварочное усилие обеспечивает передачу ультразвуковых колебаний и вызывает пластическую деформацию металла в зоне соединения. С увеличением предела текучести, твердости и толщины свариваемого металла величина  $F_{\text{св}}$  растет. При этом  $F_{\text{св}}$  и  $\xi_{\text{св}}$  взаимосвязаны, т. е. при заданной мощности механической колебательной системы с увеличением  $\xi_{\text{св}}$  сварочное усилие необходимо снижать. При соединении элементов микросхем и полупроводниковых приборов  $F_{\text{св}}$  составляет десятые доли либо единицы ньютона, а при сварке относительно толстых листов  $F_{\text{св}}$  обычно не превышает  $10^4$  Н. В процессе сварки  $F_{\text{св}}$  остается постоянным или может изменяться по определенной программе.

Время сварки зависит от других параметров, свойств и толщины свариваемого металла. Зависимость  $t_{\text{св}}$  от свойств и толщины свариваемого металла такая же, как для  $F_{\text{св}}$ . Величину  $t_{\text{св}}$  устанавливают в пределах  $0,1 \dots 4$  с.

### **1.3. Оборудование для УЗС**

Для УЗС металлов в России и за рубежом создано значительное количество универсальных и специализированных машин, которые нашли применение при изготовлении широкой номенклатуры изделий. Машины, как правило, выполнены на весьма высоком техническом уровне и позволяют автоматизировать сварочный процесс.

В последнее время существенное развитие получила ультразвуковая микросварка, предназначенная для соединения разных элементов микросхем и полупроводниковых приборов. Оборудование для ультразвуковой микросварки отличается высокими показателями производительности и уровня автоматизации всего технологического процесса сборки и сварки изделий.

### **1.4. Промышленное применение УЗС**

Процесс УЗС применяют для соединения относительно тонких листов, проволок и других деталей. Особые преимущества этот процесс имеет при соединении разнородных и термочувствительных элементов. Области использования УЗС являются: производство полупроводников, микроприборов и микроэлементов для электроники, конденсаторов, предохранителей, реле, трансформаторов, ламп бегущей волны, нагревателей бытовых холодильников, приборов точной



механики и оптики, реакторов, десублиматоров вакуумных сушильных установок; сращивание концов рулонов различных тонколистовых материалов (медь, алюминий, никель и их сплавы) в линиях их обработки, а также автомобильная промышленность.

Накопленный опыт применения УЗС выявил следующие преимущества этого процесса:

1. Осуществление сварки в твердом состоянии металла без существенного нагрева места сварки, что дает возможность соединять химически активные металлы и разнородные металлы, склонные к образованию хрупких интерметаллидов в зоне соединения.

2. Возможность получения сварных соединений, которые трудно выполнить с помощью других видов сварки из-за больших энергетических и технологических затрат (например, сварка меди, алюминия и др.).

3. Возможность соединения тонких и ультратонких деталей, возможность приварки таких листов и фольги к деталям практически неограниченной толщины, сварка пакетов из фольги.

4. Снижение требований к чистоте свариваемых поверхностей, позволяющее проводить сварку деталей с плакированными и оксидированными поверхностями, а также деталей, поверхности которых покрыты разными изоляционными пленками.

5. Незначительная деформация поверхности деталей в месте их соединения вследствие применения небольших сварочных усилий.

6. Малая мощность сварочных машин и несложность их конструкции.

7. Простота автоматизации.

8. Гигиеничность процесса.

### **1.5. Ультразвуковая сварка пластмасс**

Способ предложен в 1958 г. учеными МВТУ им. Н. Э. Баумана под руководством акад. Г. А. Николаева. Способ ультразвуковой сварки пластмасс заключается в том, что электрические колебания ультразвуковой частоты (18...30 кГц), вырабатываемые генератором, преобразуются в механические продольные колебания магнитострикционного преобразователя и вводятся в свариваемый материал с помощью продольно-колеблющегося инструмента-волновода, расположенного перпендикулярно свариваемым поверхностям (рис. 1.3).

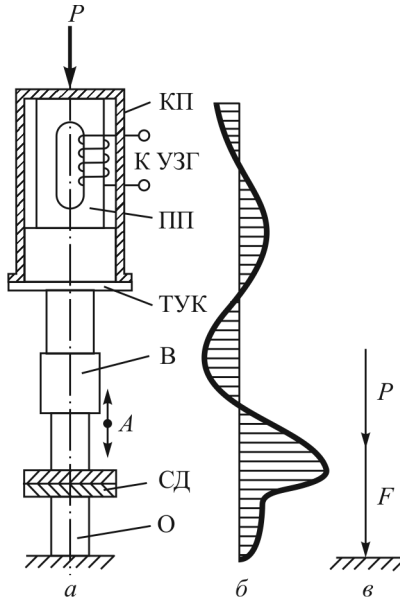


Рис. 1.3. Ультразвуковая сварка с нормальным вводом колебаний: *а* – схема сварочного узла (КП – корпус преобразователя; ПП – пакет преобразователя с обмоткой; ТУК – трансформатор упругих колебаний; В – волновод; СД – свариваемые детали; О – опора;  $A$  – амплитуда смещения волновода); *б* – эпюра амплитуды смещения колебательной системы; *в* – расположение вектора статического давления  $P$  и динамического усилия  $F$

Здесь часть энергии механических колебаний переходит в тепловую, что приводит к нагреву зоны контакта соединяемых деталей до температуры вязкотекучего состояния. Надлежащие условия ввода механических колебаний и создание тесного контакта свариваемых деталей, расположенных на опоре, обеспечиваются статическим давлением рабочего торца волновода на свариваемые детали. Это давление способствует также концентрации энергии в зоне соединения.

Динамическое усилие, возникающее в результате воздействия колеблющегося волновода, приводит к нагреву свариваемого материала, а действие статического давления обеспечивает получение прочного сварного соединения. Механические колебания и давление в этом случае действуют по одной линии перпендикулярно к свариваемым поверхностям. Такая схема ввода энергии применяется для ультразвуковой сварки пластмасс в отличие от сварки металлов, когда механические колебания

действуют в плоскости соединяемых поверхностей, а давление прикладывается перпендикулярно к ним. Подвод энергии от волновода может быть односторонним и двусторонним. По характеру передачи энергии и распределению ее по свариваемым поверхностям ультразвуковая сварка пластмасс делится на контактную и передаточную.

### 1.5.1. Контактная УЗС

Возможность передачи механической энергии в зону сварки зависит от упругих свойств и коэффициента затухания колебаний свариваемых материалов. Если полимер характеризуется низким модулем упругости и большим коэффициентом затухания, то сварное соединение можно получить лишь на малом удалении от плоскости ввода колебаний. Для равномерного распределения энергии по всей площади контакта свариваемых деталей необходимо, чтобы рабочий торец, соприкасающийся с верхней деталью, имел форму и площадь, идентичные форме и площади плоскости контакта свариваемых деталей (рис. 1.4).

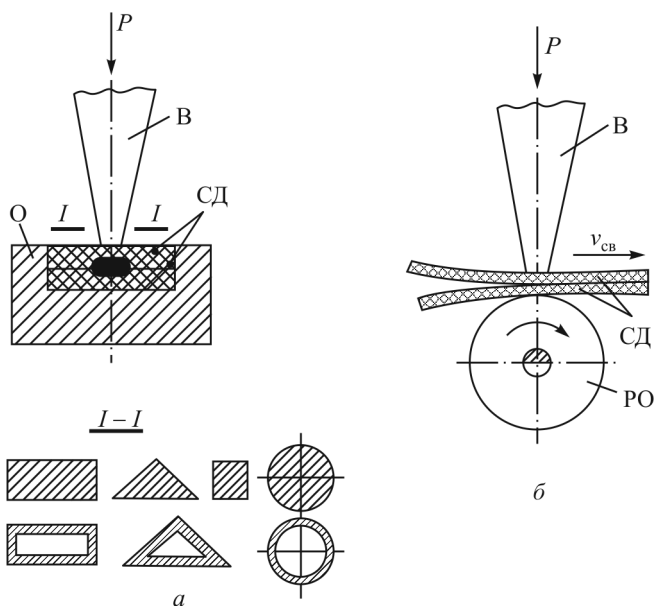


Рис. 1.4. Контактная ультразвуковая сварка: *а* – прессовая; *б* – шовная: В – волновод, СД – свариваемые детали, РО – роликовая опора, О – опора;  $P$  – давление,  $v_{св}$  – скорость сварки

Контактная ультразвуковая сварка (см. рис. 1.4) обычно применяется для соединения изделий из мягких пластмасс, таких как полиэтилен, полипропилен, поливинилхлорид, а также пленок и синтетических тканей небольшой толщины (от 0,02 до 5 мм). При этом способе сварки наиболее распространены соединения внахлестку.

### 1.5.2. Передаточная УЗС

Если полимер обладает высоким модулем упругости и низким коэффициентом затухания, то сварное соединение можно получать на большом удалении от поверхности ввода механических колебаний (рис. 1.5). В этом случае ввод механических колебаний может осуществляться в точке или на небольшом участке поверхности верхней детали.

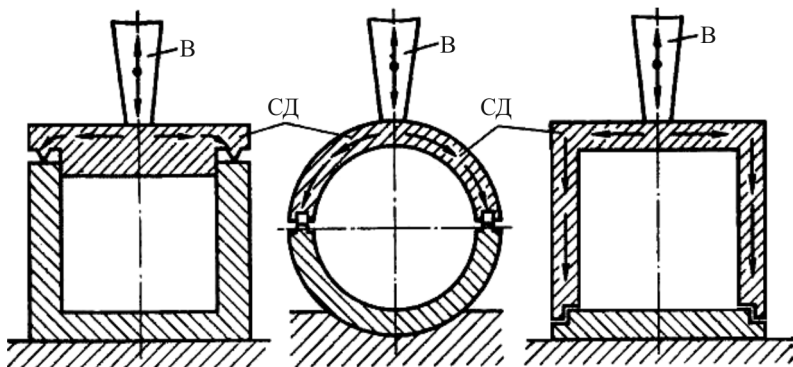


Рис. 1.5. Передаточная ультразвуковая сварка:  
В – волновод; СД – свариваемые детали

Благодаря хорошим акустическим свойствам материала изделия энергия ультразвуковой волны незначительно ослабляется при прохождении через деталь, контактирующую с волноводом, и почти полностью транспортируется к границе раздела свариваемых деталей. Тепловыделение на границе раздела в этом случае зависит от конфигурации изделия, а площадь сварки значительно отличается от площади рабочего торца волновода.

Передаточную сварку рекомендуется применять для соединения объемных деталей из жестких пластмасс, таких как полистирол, полиметилметакрилат, капрон, полиамиды, поликарбонат. Наиболее распространены стыковые и тавровые соединения.

В случае необходимости передаточной сваркой можно соединять и мягкие термопласты. Для этого свариваемые детали должны находиться в жестком застекленном состоянии, что может быть достигнуто путем охлаждения их до температуры стеклования.

### ***Контрольные вопросы***

1. Каким образом получают соединение при ультразвуковой сварке?
2. Какие узлы содержит установка для ультразвуковой сварки?
3. Какие процессы протекают при образовании сварного соединения при ультразвуковой сварке?
4. Какова температура в зоне образования сварного соединения при ультразвуковой сварке?
5. Какие материалы свариваются ультразвуковой сваркой?
6. Каковы основные параметры режима при ультразвуковой сварке?
7. В чем заключаются особенности ультразвуковой сварки пластмасс?

## 2. ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА

### 2.1. Общие сведения о лазерной сварке

#### 2.1.1. Источники энергии

Среди известных источников энергии, используемых для сварки, лазерное излучение обеспечивает наиболее высокую концентрацию энергии. На рис. 2.1 представлены значения плотности мощности  $E$ , т. е. отношение мощности источника к его площади, и диаметры  $D$  источников нагрева для основных сварочных источников энергии. Из этих данных следует, что лазерное излучение на несколько порядков превосходит по концентрации остальные источники теплоты, используемые для сварки. Такие высокие значения концентрации энергии определяются уникальными характеристиками лазерного излучения, в первую очередь его монохроматичностью и когерентностью.

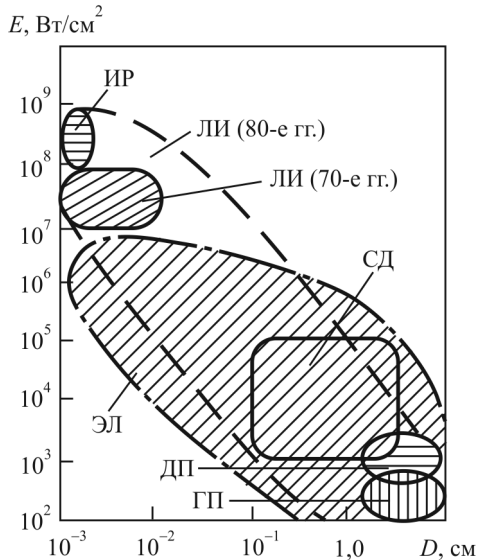


Рис. 2.1. Концентрация энергии различных тепловых источников:  
ГП – газовое пламя; ДП – дуговая плазма; ЭЛ – электронный луч;  
ИР – искровой разряд; СД – сварочная дуга; ЛИ – лазерное излучение

Лазерная сварка (ЛС), в отличие от электронно-лучевой, также обеспечивающей высокую концентрацию энергии, не требует вакуумных камер. Ее ведут либо на воздухе, либо в аргоне, гелии,  $\text{CO}_2$  и др. Лазерной сваркой можно соединять элементы любых размеров.

Лазерное излучение легко передается с помощью оптических систем в труднодоступные места, может одновременно или последовательно использоваться на нескольких рабочих местах. Оптические системы транспортировки и фокусировки лазерного излучения создают возможность легкого и оперативного управления процессом лазерной сварки.

В отличие от электронного луча, дуги и плазмы на лазерный луч не влияют магнитные поля свариваемых деталей и технологической оснастки, что позволяет получать устойчивое качественное формирование сварного шва по всему контуру.

### ***2.1.2. Виды технологических лазеров***

Для сварки металлов используются твердотельные и газовые лазеры. Технологические лазеры могут быть импульсно-периодического и непрерывного действия.

Одним из первых твердотельных лазеров для сварки был использован лазер на рубине. Активный элемент в нем – стержень из кристалла искусственного рубина. Эти лазеры обычно генерируют импульсно-периодическое излучение с длиной волны  $\lambda = 0,69$  мкм с длительностью импульсов  $\tau = 10^{-3} \dots 10^{-9}$  с, энергией в импульсе  $W_{\text{и}} \approx 10^{-2} \dots 10^3$  Дж, максимальной частотой повторения импульсов  $F_{\text{и}} \approx 10$  Гц.

Твердотельные лазеры с активным элементом в виде стержней из стекла с примесью неодима позволяют получать более высокие значения энергии излучения. Они генерируют импульсно-периодическое излучение с длиной волны 1,06 мкм. Частота импульсов изменяется от 0,05 до 50 кГц. Энергия излучения достигает в импульсе десятков джоулей при длительностях импульса  $\sim 100$  мкс с низкими частотами повторения.

Большими технологическими возможностями отличаются твердотельные лазеры с активным элементом из иттрий-алюминиевого граната (ИАГ) с добавкой неодима. Эти лазеры генерируют излучение с длиной волны 1,06 мкм как в импульсно-периодическом, так и в непрерывном режиме.

Средняя мощность излучения твердотельных лазеров достигает сотен ватт. Ограничения по уровню мощности связаны с малыми размерами искусственно выращиваемых кристаллов и их низкой теплопроводностью, что затрудняет их охлаждение в лазерных установках.

Наиболее широко используют для сварки газовые лазеры, в которых в качестве активной среды используется  $\text{CO}_2$ . Эти лазеры развивают в настоящее время среднюю мощность от нескольких десятых до десятков киловатт в непрерывном и импульсно-периодическом режимах генерации излучения с  $\lambda = 10,6$  мкм.

Лазерное излучение когерентно, монохроматично, обеспечивает малую расходимость. Вследствие этого возникает возможность высокой степени фокусировки для достижения больших значений концентрации энергии излучения, и на поверхности свариваемого материала происходит локальный нагрев, обеспечивающий высокие скорости нагрева и охлаждения, значительно превосходящие эти параметры при традиционных способах дуговой сварки, малый объем расплавленного металла, малые размеры околошовной зоны термического влияния.

### ***2.1.3. Теплофизические показатели процессов***

Лазерное излучение поверхностью материала частично отражается, а частично поглощается. Эффективный КПД процесса сварки по физической сущности является эффективным коэффициентом поглощения лазерного излучения

$$\eta_{\text{н}} = q / q_{\text{л}},$$

где  $q$  – эффективная тепловая мощность процесса лазерной сварки, т. е. мощность, поглощаемая металлом при лазерной сварке;  $q_{\text{л}}$  – мощность лазерного излучения.

Значения  $\eta_{\text{н}}$  зависят от параметров режима и условий лазерной сварки, особенно ее скорости. Это связано с влиянием размеров и формы образующегося парогазового канала на поглощение лазерного излучения. Разные состояния поверхностей образцов перед сваркой незначительно влияют на  $\eta_{\text{н}}$ , потому что при сварке кромки нагреваются до температуры  $T > T_{\text{пл}}$ , а коэффициент поглощения лазерного излучения значительно растет с ростом температуры.



Высокопроизводительные режимы лазерной сварки с большими скоростями ( $v_{св} = 25...30$  мм/с), значительно превосходящими скорость дуговой сварки, обеспечивают максимальную энергетическую эффективность процесса и рекомендуются к применению.

Оптимальные значения  $\eta_i = 0,6...0,7$  при лазерной сварке не уступают соответствующим показателям при дуговой сварке, следовательно, энергетическая эффективность лазерной сварки не ниже, чем дуговой.

Термический КПД  $\eta_t$  характеризует эффективность использования энергии, введенной в металл при сварке, и определяется отношением теплоты, необходимой для проплавления, ко всей энергии, введенной в изделие при сварке.

При высоких скоростях сварки достигаются весьма высокие значения  $\eta_t = 0,4...0,45$ , близкие к предельному теоретическому уровню (0,484) для случая проплавления тонкой пластины линейным мощным быстро движущимся источником теплоты.

Особенность лазерной сварки – высокий уровень эффективности расплавления на больших (в диапазоне 20...40 мм/с) скоростях сварки, обеспечивающих высокую производительность. Достигаемый при этом  $\eta_t = 0,35...0,40$  значительно превосходит значения, полученные при дуговой сварке ( $\eta_t < 0,2$ ).

#### ***2.1.4. Классификация методов лазерной сварки***

Методы лазерной сварки можно классифицировать по трем группам признаков (рис. 2.2).

*Энергетические признаки.* Каждый метод лазерной сварки характеризуется плотностью мощности  $E$ , Вт/см<sup>2</sup>, т. е. отношением мощности лазерного излучения к площади пятна сфокусированного луча, и длительностью воздействия излучения  $\tau$ , т. е. экспозицией непрерывного излучения или длительностью импульса при импульсном излучении.

Лазерную сварку ведут, как правило, при  $E = 1...10$  МВт/см<sup>2</sup>. Меньшие плотности мощности не рекомендуются, так как при этом более эффективны и экономичны другие методы сварки, например дуговая. При  $E > 10$  МВт/см<sup>2</sup> происходит интенсивное испарение металла, которое приводит к его выплеску и нарушению качественного формирования шва.

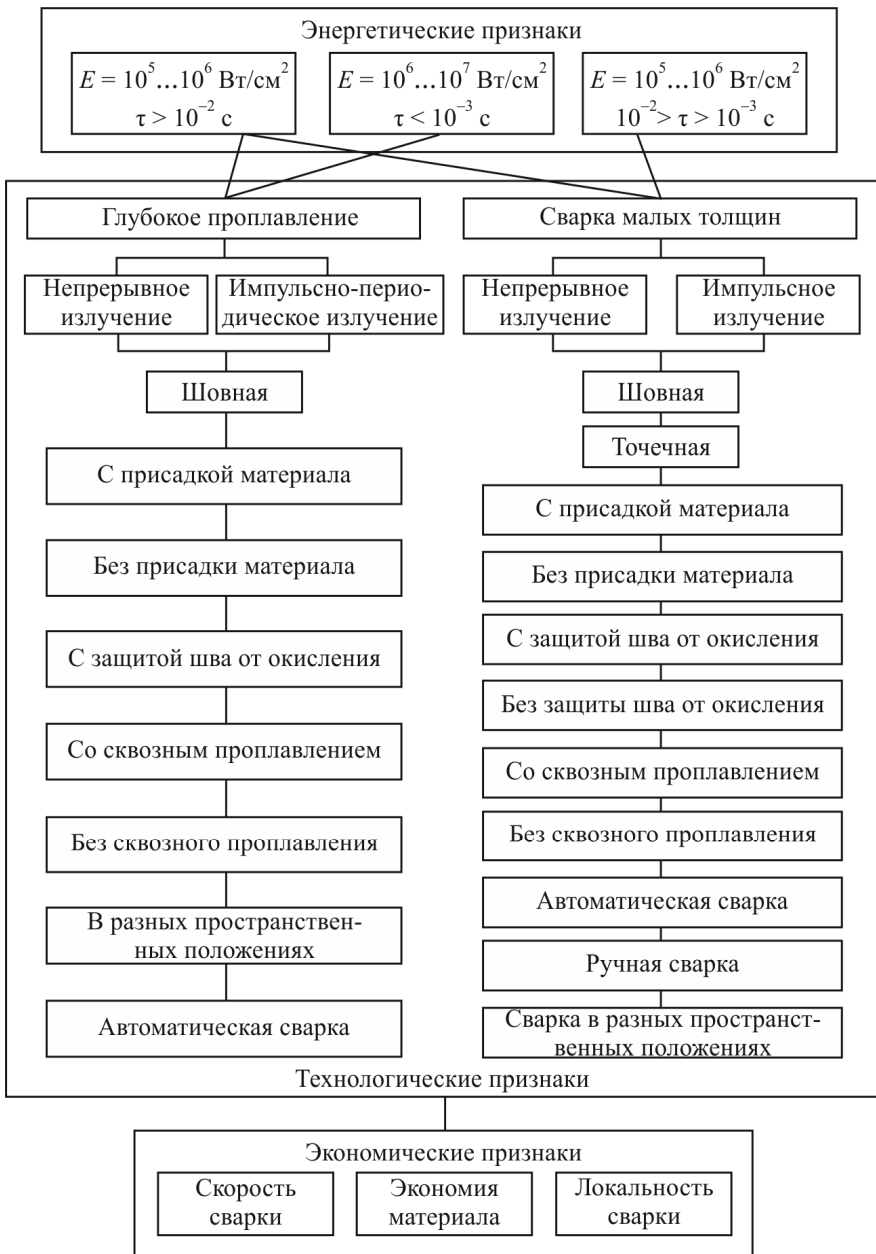


Рис. 2.2. Классификация методов лазерной сварки

Однако качественное формирование шва определяется не только плотностью мощности лазерного излучения, но и определенным сочетанием ее с длительностью воздействия излучения на материал. Возможны три основных режима с определенным сочетанием плотности мощности и длительности воздействия:

1. Режим I:  $E = 0,1 \dots 1,0$  МВт/см<sup>2</sup>,  $\tau > 10^{-2}$  с. Этот режим обеспечивается лазерами непрерывного действия. В этом случае

$$\tau = d / v_{св},$$

где  $d$  – диаметр сфокусированного излучения.

Сварка плавлением по данному режиму применима для конструкционных материалов разных толщин.

2. Режим II:  $E = 1,0 \dots 10$  МВт/см<sup>2</sup>;  $\tau < 10^{-3}$  с. Этот режим обеспечивается лазерами импульсно-периодического действия. Вследствие высоких значений плотности мощности процесс сварки высокоэффективен. Частота повторения импульсов излучения – от десятков до нескольких сотен герц. Сочетание указанных значений  $E$  и  $\tau$  позволяет осуществить сварку ряда металлов и сплавов разных толщин при меньших энергетических затратах, чем при использовании непрерывного излучения.

3. Режим III:  $E = 0,1 \dots 1,0$  МВт/см<sup>2</sup>;  $\tau = 10^{-3} \dots 10^{-2}$  с. Этот режим обеспечивается лазерами импульсно-периодического действия и используется для сварки малых толщин.

*Технологические признаки.* По этим признакам следует различать сварку металлов с глубоким проплавлением и сварку малых толщин. Лазерная сварка с глубоким проплавлением обеспечивает соединение металлов толщиной более 1,0 мм и выполняется лазерами как непрерывного действия, так и импульсно-периодическими.

Лазерную сварку с глубоким проплавлением ведут, как правило, без присадочного материала, хотя в отдельных случаях для повышения свойств шва и для улучшения свариваемости в сварочную ванну подают присадочный материал. Использование присадки позволяет осуществить сборку деталей под сварку с менее жесткими требованиями к точности зазора по длине шва, т. е. с менее жесткими условиями подготовки стыкуемых кромок.

В качестве присадки в основном применяется проволока диаметром до 1,5 мм. Лазерная сварка с присадкой обеспечивает качественное формирование шва лишь при условии точной подачи проволоки в зону плавления непосредственно под лазерным лучом.

Лазерную сварку с глубоким проплавлением в большинстве случаев ведут в защитной среде для обеспечения эффективного проплавления и хороших свойств сварных соединений. Лазерную сварку можно выполнять во всех пространственных положениях.

Скорость импульсно-периодической лазерной сварки с глубоким проплавлением примерно в десять раз меньше, чем при непрерывном лазерном излучении. Однако при этом обеспечивается более высокая эффективность проплавления по сравнению с непрерывной сваркой.

Малыми при лазерной сварке считают толщины металлов менее 1,0 мм. Принципиальным в отличие от сварки с глубоким проплавлением является отсутствие значительного перегрева и интенсивного испарения расплавленного металла шва.

Сварку малых толщин ведут как непрерывными, так и импульсно-периодическими лазерами. При использовании непрерывного излучения выполняется шовная сварка, а импульсно-периодическое излучение позволяет выполнять как точечную, так и шовную сварку. В последнем случае шов формируется перекрытием отдельных точек.

В большинстве случаев сварку малых толщин ведут без присадки.

Принципиально сварку малых толщин, в особенности при выполнении точечных соединений, можно проводить без защитной среды. На эффективность проплавления в данном случае защитные газы не оказывают существенного влияния. Однако в тех случаях, когда необходимо предохранить швы от окисления, в особенности при сварке титана, молибдена, ниобия, циркония и других активных материалов, применяют защитные газы.

*Экономические признаки.* Методы лазерной сварки характеризуются своеобразными экономическими признаками, которые необходимо учитывать как при разработке технологического процесса, так и при проектировании сварных соединений.

Одним из важных признаков, определяющих производительность процесса сварки, является скорость. Лазерная сварка непрерывным излучением выполняется с весьма высокими скоростями, позволяю-

щими в 10...15 раз увеличить производительность по сравнению с традиционными методами сварки плавлением. Наряду с высокой производительностью лазерная сварка энергетически эффективна, так как благодаря высокой концентрации энергии излучения процесс сварки осуществляется с минимальной погонной энергией, определяемой отношением мощности к скорости сварки.

Лазерная сварка на высоких скоростях наряду с повышением производительности и энергетической эффективности обеспечивает минимальные остаточные деформации и снижение склонности к образованию горячих и холодных трещин при сварке целого ряда конструкционных материалов. Однако высокая скорость достигается не во всех случаях лазерной сварки. В частности, лазерная сварка импульсно-периодическим излучением осуществляется на меньших скоростях, сопоставимых со скоростями традиционных методов сварки плавлением.

Одним из важных экономических признаков, свойственных процессу лазерной сварки, является значительная экономия сварочных материалов вследствие малых объемов расплавленного металла шва. В частности, лазерная сварка металла толщиной 5...20 мм может быть выполнена за один проход без предварительной разделки кромок и без использования присадочной проволоки. Для сопоставления отметим, что дуговая сварка металла толщиной порядка 20 мм выполняется как многопроходная с разделкой кромок и с использованием присадочного материала.

Высокая концентрация энергии лазерного излучения позволяет осуществлять сварку сфокусированным лучом с минимальным диаметром пятна 0,1 мм, обеспечивая значительную локальность обработки. Это условие локальности обеспечивает рациональное и экономически целесообразное проектирование сварных деталей и конструкций с учетом возможностей сварки в крайне ограниченной по размерам зоне, а также в труднодоступных местах. В частности, лазерная сварка в электронике благодаря локальности обеспечивает проектирование крайне уплотненных схем, сварных корпусов приборов минимальных размеров и т. д.

Важным обстоятельством, связанным с локальностью процесса лазерной сварки, являются минимальные остаточные деформации. Это дает возможность проектировать технологию изготовления свар-

ных конструкций без использования дорогостоящих методов последующего уменьшения либо устранения остаточных деформаций. Лазерная сварка – прецизионный процесс соединения деталей, в ряде случаев ее можно рассматривать как финишную операцию.

## **2.2. Технология лазерной сварки**

### **2.2.1. Применение лазерной сварки**

До настоящего времени отработана технология лазерной сварки малых и средних (5...10 мм) толщин. Однако широкое применение лазерной сварки в ряде случаев сдерживается соображениями экономического характера. Стоимость технологических лазеров пока еще достаточно высока, что требует тщательного анализа возможностей применения лазерной сварки. Перспектива для лазерной сварки появляется тогда, когда применение традиционных способов сварки сопряжено с трудностями.

Лазерную сварку следует рекомендовать:

а) при необходимости получения прецизионной конструкции, форма и размеры которой практически не должны изменяться в результате сварки; возможности значительного упрощения технологии изготовления сварных конструкций за счет выполнения сварки в виде заключительного процесса без последующих операций правки либо механической обработки для достижения требуемой точности;

б) необходимости существенного увеличения производительности, так как процесс лазерной сварки может осуществляться на скоростях 100...200 м/ч и более, что в несколько раз превышает скорость наиболее распространенного традиционного способа дуговой сварки;

в) производстве крупногабаритных конструкций малой жесткости с труднодоступными швами. При этом в отличие от электронно-лучевой сварки не требуются вакуумные камеры;

г) соединении трудносвариваемых материалов, в том числе разнородных.

Лазерное излучение рекомендуется к использованию для изготовления конструкций с учетом технологических особенностей лазерной сварки основных конструкционных материалов.

### *2.2.2. Лазерная сварка сталей*

Качество и надежность сварных соединений, выполняемых лазерным лучом, в значительной степени определяются точностью сборки элементов под сварку. Необходимая точность сборки достигается подготовкой свариваемых кромок на металлорежущих станках (строганием, фрезерованием, точением).

Поверхность металла в зоне сварки следует очищать от окалины, ржавчины, других загрязнений, а также от влаги. Указанные загрязнения и влага создают условия для образования пористости, оксидных включений, а в некоторых случаях и холодных трещин в металле шва и зоне термического влияния за счет насыщения водородом.

Зачищать свариваемые поверхности следует щетками из нержавеющей стали на участке не менее 10...15 мм как выше, так и ниже свариваемых кромок. Зачищаются также торцевые поверхности, прилегающие к свариваемым участкам. После зачистки место сварки рекомендуется обезжирить.

Сборка под сварку должна обеспечивать возможность тщательной подгонки кромок по всей длине шва с минимальным зазором и перекосом кромок. При толщине свариваемого материала более 1,0 мм зазор не должен превышать 5...7 % толщины (не более 0,2...0,3 мм). Смещение одной кромки относительно другой по высоте не должно превышать 20...25 % от толщины свариваемых деталей (не более 0,5 мм).

При сборке под сварку не рекомендуются прихватки. В случае необходимости прихватки следует выполнять лучом лазера.

Предпочтительное соединение – стыковое, нахлесточные и замковые соединения углеродистых сталей не рекомендуются из-за высокой чувствительности к концентраторам напряжений.

Защищать поверхности шва от окисления следует гелием или смесью гелия с аргоном в соотношении 2:1, а также аргона с углекислым газом при соотношении 3:1, подаваемыми через специальное сопло. Корень шва с обратной стороны рекомендуется защищать аргоном. В некоторых случаях при сварке низкоуглеродистых сталей допускается отсутствие защиты шва.

Оптимально выбранные режимы непрерывной лазерной сварки сталей обеспечивают сочетание качественного формирования шва, высокой технологической прочности и высоких механических свойств

сварного соединения. Эти оптимальные режимы сварки сталей обеспечиваются сравнительно высокими (80...120 м/ч) скоростями сварки. При этом мощность лазерного излучения ориентировочно выбирается из условия 1 кВт на 1 мм толщины свариваемой детали.

### ***2.2.3. Лазерная сварка алюминиевых и магниевых сплавов***

Сварка алюминиевых и магниевых сплавов характеризуется рядом особенностей, связанных со взаимодействием расплавленного металла с газами окружающей среды, испарением легирующих элементов, образованием на поверхности ванны оксидной пленки, затрудняющей качественное проведение сварочного процесса. Основные трудности сварки алюминия и его сплавов в большинстве своем устраняются применением концентрированных источников энергии, к которым относятся лазерный и электронный луч.

Под лазерную сварку соединяемые поверхности подготавливают так же тщательно, как и под дуговую, включая механическую обработку, травление с последующим осветлением, промывку в горячей воде и зачистку шабером непосредственно перед сваркой.

Лазерную сварку осуществляют в среде защитных газов. Обычно рекомендуется использовать гелий для защиты верхней части сварочной ванны, а для корневой части шва может быть использован аргон. Расход гелия должен быть не менее 7...8 л/мин, а аргона 5...6 л/мин.

При лазерной сварке алюминиевых сплавов наблюдается характерная особенность расплавления металла при определенном уровне мощности и плотности мощности. Например, для сплава АМгб пороговая мощность излучения  $\text{CO}_2$  составляет 2...2,2 кВт. При этом сразу достигается глубина проплавления 1,5...2,0 мм, а при меньших значениях мощности проплавление полностью отсутствует. Это обстоятельство связано с высоким коэффициентом отражения алюминиевой поверхностью и последующим резким его снижением после начала плавления.

Прочность сварных соединений толщиной 2,0...3,0 мм составляет не менее 0,9 от прочности основного металла при сварке без присадочной проволоки. Разрушаются соединения преимущественно по шву.

Сварные швы магниевых сплавов, выполненные лучом лазера, хорошо формируются, не образуя провисания при сварке на весу. Это позволяет в отличие от дуговой сварки осуществлять лазерную сварку



без применения подкладок, что существенно упрощает технологию изготовления конструкций, особенно крупногабаритных.

Механические свойства сварных соединений, выполненных лазерным излучением с оптимальными параметрами режимов, находятся на уровне соответствующих свойств основного металла.

#### ***2.2.4. Лазерная сварка титановых сплавов***

Основными трудностями сварки титановых сплавов являются высокая химическая активность металла при повышенных температурах, особенно в расплавленном состоянии, склонность к росту зерна при нагреве до 330...350 °С и выше, а также повышенная склонность к образованию холодных трещин при увеличении содержания в шве и околошовной зоне примесей газов, в особенности водорода. Перечисленные трудности устраняются при сварке с минимальными значениями погонной энергии, обеспечиваемыми такими высококонцентрированными источниками энергии, как лазерный и электронный лучи.

Необходимой является тщательная подготовка кромок под сварку, включающая механическую обработку или дробеструйную, пескоструйную с последующим химическим травлением, осветлением и промывкой.

Существенно влияет на свойства сварных соединений качество защиты поверхности, корня шва, остывающих до 400...500 °С участков шва и околошовной зоны. Для защиты поверхности шва и плазмоподавления в зоне лазерного воздействия используется гелий высокой чистоты с ориентировочным расходом 10...12 л/мин. Для защиты остывающей поверхности и корня шва можно применять аргон повышенной чистоты с ориентировочным расходом для корня шва 4...5 л/мин и для поверхности шва 15...18 л/мин.

Хорошие механические свойства сварных соединений, выполненных лазерной сваркой, связаны с высокой скоростью процесса и соответственно с высокими скоростями охлаждения металла шва и околошовной зоны, составляющими в полиморфной области 400...600 °С/с (по сравнению с 20...25 °С/с при дуговой сварке). Это приводит к повышению дисперсности металла шва в 3...4 раза, а также значительному измельчению зерна в околошовной зоне.

## 2.3. Оборудование для лазерной сварки

Оборудование для лазерной сварки состоит из источника когерентного излучения – технологического лазера, системы транспортировки и фокусировки излучения, системы газовой защиты изделия, системы относительного перемещения луча и изделия. Технологические лазеры можно разбить на две основные группы: твердотельные и газовые.

### 2.3.1. Твердотельные лазеры

В излучателях твердотельных лазеров в качестве рабочего тела используются активные элементы из рубина, стекла с присадкой ионов неодима, иттрий-алюминиевого граната (ИАГ) с неодимом. «Накачку» (возбуждение активного элемента) осуществляют световым потоком (от мощных дуговых криптоновых ламп). Длина волны излучения в зависимости от материала рабочего тела 0,37...1,064 мкм. КПД этих лазеров составляет 1...3 %.

Основные функциональные узлы излучателя (рис. 2.3): рабочее тело, система «накачки», включающая электрические лампы и отражатель, концентрирующий световую энергию на рабочем теле, система охлаждения, резонатор.

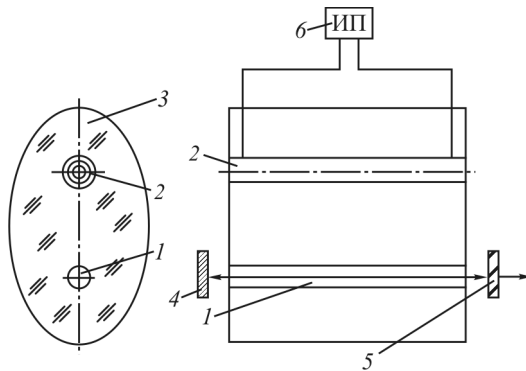


Рис. 2.3. Схема твердотельного лазера: 1 – рабочее тело; 2 – криптоновая лампа; 3 – отражатель; 4 – глухое зеркало резонатора; 5 – выходное зеркало резонатора; 6 – источник питания

Лазеры работают в непрерывном и импульсном режимах. Последний реализуется либо модуляцией добротности при непрерывной «накачке», либо импульсной «накачкой».

### *2.3.2. Газовые лазеры*

В технологических газовых лазерах в качестве рабочего тела в основном используется смесь  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  и He при давлении 2,66...13,3 кПа. Возбуждение рабочего тела осуществляется электрическим разрядом. Два последних газа обеспечивают передачу энергии возбуждения молекуле  $\text{CO}_2$  и благоприятные условия горения разряда. Длина волны излучения 10,6 мкм, КПД 5...15 %.

Основные функциональные узлы лазера (рис. 2.4): вакуум-плотный замкнутый контур, внутри которого смонтировано устройство для прокачки рабочей смеси газов; являющаяся частью контура электроразрядная камера, резонатор; вакуумный насос для откачки контура; система охлаждения рабочей смеси и оптических систем; источник питания; система управления; системы коммутации и измерения лазерного излучения.

По способу охлаждения рабочей смеси – диффузное (медленная прокачка) и конвективное (быстрая прокачка) – лазеры делятся на две группы. Первая из них применяется в трубчатых однолучевых лазерах со сравнительно малой мощностью и в многолучевых лазерах, вторая (со скоростью прокачки газа до 100 м/с) – в лазерах мощностью свыше 1 кВт. По направлению газового потока относительно электродов газоразрядной камеры и зеркал резонатора последняя группа делится на лазеры с продольной прокачкой и поперечной прокачкой. Возбуждение («накачка») рабочего газа осуществляется: разрядом постоянного тока; высокочастотным разрядом и разрядом постоянного тока с импульсной предыонизацией. Мощные электроионизационные лазеры с предыонизацией пучком электронов, созданные в России и за рубежом, к настоящему времени широкого распространения не получили.

Многопроходные устойчивые и неустойчивые резонаторы лазеров обеспечивают качество излучения с расходимостью 5...1 мрад. В устойчивых резонаторах выходное зеркало, как правило, изготавливают из селенида цинка. Качество материала и обработки этого элемента в значительной мере определяет качество излучения лазера. Глухое и промежуточные зеркала устойчивых резонаторов, а также выходное зеркало неустойчивых резонаторов изготавливают из меди, кремния и других материалов с покрытиями, обеспечивающими коэффициент отражения 98...99,6 % для длины волны 10,6 мкм.

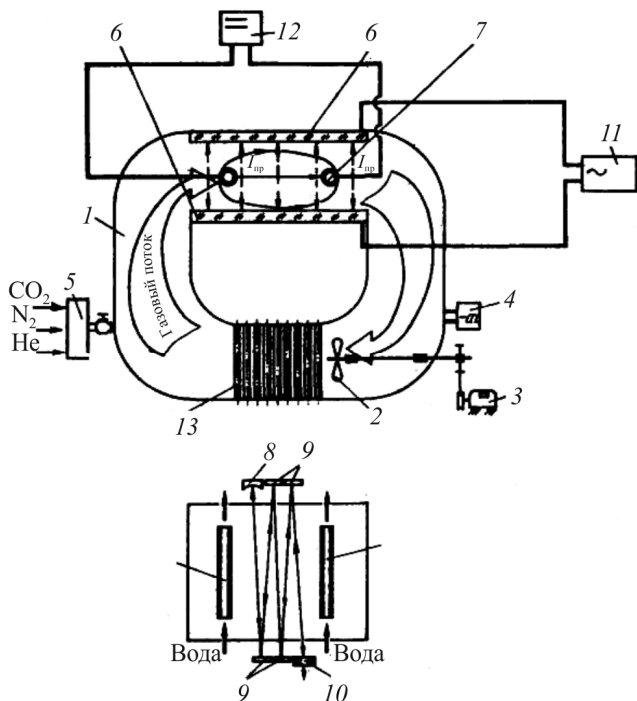


Рис. 2.4. Схема газового лазера: 1 – газовый контур; 2 – вентилятор прокачки; 3 – электропривод вентилятора; 4 – вакуумный насос; 5 – система подачи рабочих газов; 6 – электроды предыонизации; 7 – электроды основного разряда; 8 – глухое зеркало резонатора; 9 – промежуточные зеркала резонатора; 10 – выходное зеркало резонатора; 11 – источник питания предыонизации; 12 – источник питания основного разряда; 13 – теплообменник

Охлаждение оптики и юстировочных узлов резонатора осуществляется обычно термостабилизированной двухконтурной водяной системой, а охлаждение рабочего газа теплообменником газ – вода с развитой рабочей поверхностью.

Система управления лазером обеспечивает заданный цикл работы, необходимые блокировки, стабилизацию основных параметров и выполнена в виде отдельных электронных блоков или микроконтроллера. Коммутация лазерного излучения осуществляется либо внешним поглотителем, являющимся одновременно калориметрическим индикатором мощности излучения с постоянной времени от 5 до 30 с, либо ком-

мутацией электрического разряда в камере. Для индикации мощности в процессе сварки или резки используется ответвитель в виде вращающегося пропеллера, направляющего 1...3 % мощности на болометрический или другой датчик. В случае если глухое зеркало резонатора пропускает часть излучения, датчик устанавливается непосредственно за ним. Постоянная времени датчиков 1...100 мс.

Лазеры с расходимостью луча 1...2 мрад рекомендуется использовать для резки, сварки и термообработки, 2...3 мрад – для сварки и термообработки, более 4 мрад – только для термообработки.

### ***2.3.3. Система транспортировки и фокусировки лазерного излучения***

Система транспортировки и фокусировки излучения (СТФЛ) состоит из защитных лучепроводов, отклоняющего зеркала и фокусирующего устройства. Отклоняющее зеркало изменяет ход луча и направляет его в зону обработки. Для маломощных твердотельных лазеров с длиной волны излучения 1,06 мкм с этой целью используются призмы полного внутреннего отражения и интерференционные зеркала с многослойным диэлектрическим покрытием. Для CO<sub>2</sub>-лазеров применяют медные зеркала, для мощных лазеров – зеркала с водяным охлаждением. Фокусирующее устройство представляет собой тубус, установленный с возможностью перемещения относительно поверхности обрабатываемого изделия, в котором закреплена линза из оптического стекла для твердотельных лазеров, из хлорида калия или селенида цинка с интерференционным просветляющим покрытием для газовых лазеров.

Защита линз (кроме стеклянных) от продуктов, выделяющихся при обработке изделия, осуществляется шторкой, образуемой продуваемым очищенным и осушенным воздухом. Для получения высоких плотностей мощности (5 МВт/см<sup>2</sup>), обеспечивающих «кинжальное» проплавление при сварке, фокусное расстояние линз не должно превышать 10...15 см. Уменьшение фокусного расстояния также нежелательно из-за трудности защиты линз от продуктов деструкции и увеличения сферической аберрации. Применяются, кроме того, фокусирующие устройства с отражательной оптикой в виде одного фокусирующего зеркала или разных вариантов объектива Кассегрена.

### ***2.3.4. Система газовой защиты зоны лазерной сварки***

Система газовой защиты предназначена для предотвращения окисления металла сварного шва, в том числе его корня, и включает сопла разнообразной конструкции. Конструкция сопел, кроме того, должна обеспечивать сдув паров и брызг, образующихся при сварке, в сторону от оси лазерного луча. В зависимости от химической активности свариваемых металлов, мощности излучения лазера и требуемой глубины проплавления используется конкретная конструкция сопла и подбирается состав подаваемого в зону обработки газа.

### ***2.3.5. Система относительного перемещения лазерного луча и изделия***

Относительное перемещение луча и изделия реализуется обычно за счет движения детали, осуществляемого манипулятором с ЧПУ с разным числом степеней свободы в зависимости от требуемой сложности обработки. Скорость перемещения 40...400 м/ч. В случае обработки массивных и крупногабаритных изделий рационально перемещать луч с помощью подвижных зеркал. Наибольший интерес представляет система с рабочим инструментом, закрепленным в руке антропоморфного робота. Излучение от лазера к инструменту передается через зеркала, установленные в шарнирных узлах робота.

### ***Контрольные вопросы***

1. Каковы особенности лазерного луча как источника теплоты при лазерной сварке?
2. Какие виды лазеров используются для лазерной сварки?
3. Каковы термические показатели процесса лазерной сварки?
4. Какие защитные среды применяют при лазерной сварке?
5. Какова область применения лазерной сварки?
6. Каковы технологические особенности лазерной сварки различных материалов?
7. Как устроены системы фокусировки и транспортировки лазерного луча?

### 3. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА

#### 3.1. Общие сведения об электронно-лучевой сварке

##### 3.1.1. Сущность процесса

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) осуществляется в вакууме за счет расплавления кромок основного металла сфокусированным потоком электронов, имеющим высокую удельную мощность  $q_2$ . Технологический диапазон  $q_2$  для целей нагрева, плавления, испарения составляет  $\approx 10^4 \dots 5 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>. Сварка металлов малых толщин (до 3 мм) ведется с удельной мощностью  $q_2 = 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>, когда испарение с поверхности сварочной ванны незначительно. Для однопроходной сварки металлов больших толщин (до 200...300 мм) требуется плотность мощности электронного луча  $q_2 = 10^5 \dots 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>. В этом случае проникновение электронного луча на большую глубину сопровождается испарением металла и формированием канала проплавления, на стенках которого рассеивается практически вся мощность электронного луча. Канал проплавления, поверхность которого сильно перегрета относительно температуры плавления металла  $T_{пл}$  (температура поверхности может достигать температуры кипения  $T_{кип}$ ), движется через толщу металла, образуя по всей глубине канала область расплава металла, который перемещается в хвостовую часть ванны и там кристаллизуется.

Переход от сварки металлов малых толщин к однопроходной сварке металлов больших толщин осуществляется по достижении критической удельной мощности  $q_2^*$ , величина которой для большинства металлов составляет  $10^5 \dots 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>. Верхнее значение удельной мощности электронного луча для технологических целей ограничено уровнем  $10^9$  Вт/см<sup>2</sup> (при больших значениях  $q_2$  процесс обработки материала становится неуправляемым из-за взрывного характера разлета образующейся плазмы). Высокая концентрация энергии в луче позволяет получать при больших скоростях ЭЛС узкие и глубокие сварные швы с минимальной зоной термического влияния и высокими механическими свойствами металла шва и околошовной зоны.

### 3.1.2. Параметры и показатели ЭЛС

Параметрами электронного луча, измеряемыми в процессе сварки, являются ток луча  $I$ , ускоряющее напряжение  $U$ , ток фокусирующей системы  $I_{\phi}$ , рабочее расстояние (расстояние от центра фокусирующей системы до поверхности свариваемого изделия)  $l$ , угол сходимости луча  $\alpha$ , скорость перемещения луча  $v_{\text{св}}$ . При заданных значениях параметров: полной мощности  $q = IU$ , токе луча  $I$ , токе фокусировки  $I_{\phi}$  – можно определить диаметр электронного луча  $d$  и удельную мощность  $q_2$ , Вт/см<sup>2</sup>:

$$q_2 = IU / (\pi d^2 / 4).$$

При использовании импульсно-периодического режима сварки средняя мощность луча, Вт:

$$q_{\text{ср}} = I_{\text{и}} U f \tau,$$

где  $I_{\text{и}}$  – ток луча в импульсе, А;  $U$  – ускоряющее напряжение, В;  $f$  – частота следования импульсов, Гц;  $\tau$  – длительность импульса, с.

Количественными показателями ЭЛС являются:  $Q_1$  – погонная энергия (затраты энергии на единицу длины сварного шва), Дж/см,  $Q_1 = q/v_{\text{св}}$ ;  $Q_2$  – затраты энергии на формирование единицы площади стыка, Дж/см<sup>2</sup>,  $Q_2 = q/v_{\text{св}}H$ ;  $q/H$  – затраты мощности на единицу глубины сварного шва, Вт/см;  $K$  – коэффициент формы шва,  $K = H/B$  (здесь  $B$  – ширина шва,  $H$  – глубина шва).

Типичные интервалы значений параметров электронного луча для сварки следующие:  $q = 1 \dots 120$  кВт при  $U = 25 \dots 120$  кВ,  $\alpha = 1 \dots 5^\circ$ ,  $v_{\text{св}} = 0,1 \dots 3$  см/с,  $d = 0,1 \dots 3$  мм,  $f = 1 \dots 100$  Гц,  $\tau = 5 \dots 100$  мс,  $K > 10$ .

### 3.1.3. Камеры и вакуум для ЭЛС

ЭЛС осуществляют чаще всего вертикальным либо горизонтальным лучом (рис. 3.1) в вакуумных камерах, размеры которых зависят от габаритов свариваемых изделий. Объем камер современных установок составляет от 0,1 (и менее) до сотен кубических метров.

Камера с находящейся на ней (или в ней) электронной пушкой, формирующей электронный луч, может вакуумироваться как до высокого ( $\sim 10^{-3}$  Па), так и до низкого ( $\sim 1 \dots 10$  Па) вакуума, но с отдельной откачкой полости электронной пушки до  $10^{-3}$  Па.



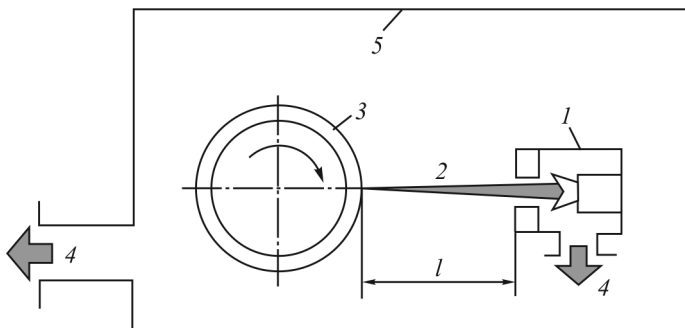


Рис. 3.1. Схема установки электронно-лучевой сварки: 1 – пушка, 2 – электронный луч; 3 – изделие (труба); 4 – вакуумирование; 5 – камера

Даже в низком вакууме ( $\sim 1$  Па) содержание кислорода в 17 раз, а азота в 10 раз меньше, чем в особо чистом аргоне, поэтому при ЭЛС защита расплавленного металла очень эффективна.

Установки с выпуском электронного луча в атмосферу на расстоянии 15...20 мм при  $U = 175...200$  кВ обеспечивают мощность до 40 кВт и коэффициент формы шва  $K \approx 3$  из-за малой удельной мощности вследствие сильного рассеяния луча.

## 3.2. Нагрев металла при ЭЛС

### 3.2.1. Глубина пробега электронов в твердом теле и газе

Максимальную глубину пробега электронов  $\delta$  в твердом теле для целей ЭЛС чаще всего определяют по формуле Шонланда:

$$\delta = 2,35 \cdot 10^{-12} U^2 / \rho,$$

где  $U$  – ускоряющее напряжение, В;  $\rho$  – плотность металла, г/см<sup>3</sup>;  $\delta$  – глубина проникновения, см. Для алюминия  $\rho = 2,7$  г/см<sup>3</sup>. При  $U = 50$  кВ получают  $\delta = 22$  мкм.

Экспериментально и теоретически установлено, что максимум энерговыделения по глубине пробега находится под поверхностью.

На рис. 3.2 представлена экспериментальная зависимость изменения глубины проникновения электронов в железо от ускоряющего напряжения. Для ряда металлов отношение  $\delta/\delta_{Fe}$  имеет следующие значения: Ni 0,85; Cr 1,1; Cu 0,88; Al 2,8; W 0,48; Ta 0,54; Pb 0,81.

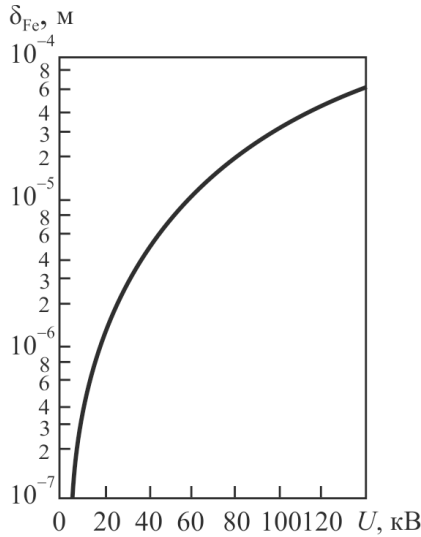


Рис. 3.2. Зависимость глубины проникновения электронов в железо  $\delta_{Fe}$  от ускоряющего напряжения  $U$

Если электронный луч проходит через пар (газ), то поглощение его мощности соответствует закону

$$q_{2к} = q_{2н} \exp(-\gamma \rho H),$$

где  $q_{2н}$  – начальная удельная мощность луча, Вт/см<sup>2</sup>;  $q_{2к}$  – удельная мощность луча после прохождения через слой пара (газа), Вт/см<sup>2</sup>;  $H$  – толщина слоя пара (газа), см;  $\rho$  – плотность пара (газа), г/см<sup>3</sup>;  $\gamma$  – коэффициент поглощения, см<sup>2</sup>/г,  $\gamma = 2,4 \cdot 10^6 \cdot U^2$  (здесь  $U$  – напряжение, кВ).

### ***3.2.2. Характер теплового источника при электронно-лучевом нагреве***

Тепловой источник при электронно-лучевом нагреве представляют как нормально распределенный по поверхности и объему с максимумом под поверхностью нагреваемого тела.

С увеличением ускоряющего напряжения (а следовательно, и глубины проникновения электронов) максимум температуры перемещается в глубь металла. Поэтому теоретически возможна ситуация, когда поверхность материала не успевает нагреться, хотя на глубине (в максимуме энерговыделения) достигается температура кипения.

На характер распределения температурного поля в зоне электронно-лучевого нагрева существенное влияние оказывает отношение диаметра луча к глубине пробега электронов. Установлено, что, например, обработка материала (плавление и выброс) эффективна только при условии, что  $d > 2\delta$ , т. е. использование очень тонких пучков электронов затруднено.

### 3.2.3. Критическая удельная мощность

Критическая удельная мощность, при которой имеет место кинжальное проплавление металла, определяется характерным временем  $\tau^*$ , которое зависит от теплофизических свойств металла. В течение этого времени из объема, ограниченного диаметром луча  $d$  и глубиной пробега электронов  $\delta$ , тепло не успевает отводиться механизмом теплопроводности. Критическая удельная мощность электронного луча, при которой начинается глубокое проплавление,

$$q_2^* = S_{\text{кип}} \rho \delta / \eta_n \tau^*,$$

где  $S_{\text{кип}}$  – теплосодержание кипящего металла, Дж/см<sup>3</sup>,  $S_{\text{кип}} = \rho \times (cT_{\text{кип}} + L_{\text{исп}})$ ;  $c$  – теплоемкость металла, Дж/кг;  $L_{\text{исп}}$  – удельная теплота испарения, Дж/кг;  $\rho \delta$  – массовая толщина слоя, г/см<sup>2</sup>, определяемая по формуле Шонланда;  $\eta_n$  – эффективный КПД электронно-лучевого нагрева поверхности.

Эта формула определяет условия, когда в течение характерного времени  $\tau^*$  в слой  $\rho \delta$  вводится удельная мощность, приводящая к испарению (вскипанию) этого слоя.

Расчеты для титана при  $U = 30$  кВ,  $\eta_n = 0,9$ ,  $\tau^* = 124$  мкс,  $S_{\text{кип}} = 1,1 \cdot 10^4$  Дж/г дают значение критической удельной мощности  $q_2^* = 2 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>. Для алюминия при  $U = 30$  кВ,  $\eta_n = 0,9$ ,  $\tau^* = 14 \cdot 10^{-6}$  с,  $S_{\text{кип}} = 1,3 \cdot 10^4$  Дж/г  $q_2^* = 2 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>. Для нержавеющей стали при  $U = 30$  кВ  $q_2^* = 1,3 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>.

### 3.3. Формирование канала проплавления при ЭЛС

Теоретически и экспериментально установлено, что процесс формирования глубокого проплавления при ЭЛС имеет автоколебательный характер.

При формировании сварного шва наблюдаются два основных типа периодических процессов: периодическое испарение по мере углубления электронного луча в металл (с частотами порядка единиц и десятков килогерц) и колебания жидкого металла в сварочной ванне за счет периодического «строгания» передней стенки (с частотой порядка 1...100 Гц).

Для ЭЛС характерно, что при постоянном во времени потоке энергии возникают колебания физических параметров, характеризующих систему луч – вещество, а именно: потока пара, интенсивности светового излучения, эмиссии электронов и т. п. из зоны воздействия луча. Существует критическое значение потока энергии для возбуждения колебаний: если  $q_2 > q_2^*$ , то колебания возникают, если  $q_2 < q_2^*$ , то не возникают.

При нагреве вещества постоянным во времени потоком энергии, который больше некоторого критического значения, отмечаются существенные особенности в характере изменения температуры поверхности: она не стремится к постоянному значению, но колеблется относительно некоторого среднего значения. Эта закономерность обусловлена возникновением автоколебаний температуры и плотности пара в процессе нагрева.

Механизм автоколебаний заключается в экранировке потока энергии паром вещества и в существовании релаксационных процессов в газодинамике пара. Критическое значение потока энергии, амплитуда, частота колебаний зависят от параметров потока энергии, теплофизических характеристик материала, газодинамических характеристик пара и характеристик взаимодействия потока энергии с паром.

Автоколебательной системой называют систему, преобразующую энергию постоянного источника в энергию колебаний.

Расчеты показывают, что при  $q_2 = 10^5 \dots 10^6$  Вт/см<sup>2</sup> для сталей, алюминия, титана частота автоколебаний составляет  $10^2 \dots 10^4$  Гц.

Закономерность существования незатухающих во времени собственных колебаний температурного поля и плотности пара позволяет рассматривать физику этих процессов с качественно новой точки зрения. В частности, это приводит к выводу о существовании резонансных режимов нагрева вещества.

Использование резонансных режимов нагрева открывает широкие возможности для повышения эффективности разработки новых способов сварки и обработки материалов концентрированными источниками энергии.

Регистрация характеристик автоколебаний дает новые возможности для построения систем контроля и регулирования процесса ЭЛС.

### 3.4. Специфические дефекты сварных швов при ЭЛС

Специфическими дефектами при сварке с несквозным проплавлением в основном являются: не заполненные металлом полости размером до 5...10 мм и длиной до 20...30 мм и периодическое несплавление корня шва.

Появление корневых дефектов (периодических несплавлений корня шва) объясняют периодическими колебаниями жидкого металла в сварочной ванне и связанным с этими колебаниями периодическим переключением (захлопыванием) канала (рис. 3.3). В течение переключения некоторое время энергия луча тратится на «сверление» слоя жидкой фазы, т. е. совершается работа по формированию некоторой доли глубины канала, что реально приводит к местному уменьшению глубины канала именно на эту долю.

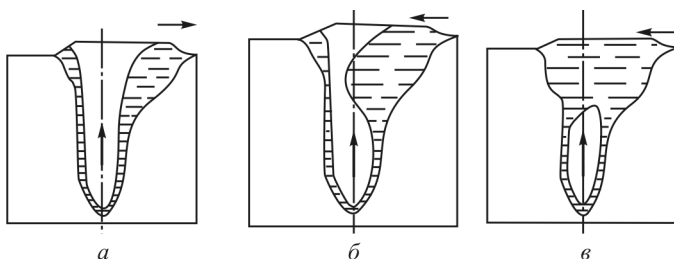


Рис. 3.3. Схема поведения канала проплавления при ЭЛС:

*а* – канал свободен от жидкости; *б* – отражение волны жидкого металла от хвостовой части ванны; *в* – захлопывание канала

К специфическим дефектам ЭЛС следует также отнести отклонение канала проплавления от линии стыка вследствие отклонения луча магнитным полем при сварке сталей с остаточной намагниченностью. Для ликвидации этого дефекта прибегают к предварительному размагничиванию свариваемого изделия.

### 3.5. Технология ЭЛС

Сварку электронным лучом можно успешно применять в нижнем положении вертикальным лучом, вертикальным и горизонтальным швом на вертикальной стене (горизонтальным лучом) с неполным и сквозным проплавлением. Сварка в нижнем положении рекомендуется для толщин до 40 мм для сталей и до 80 мм для титановых и алюминиевых сплавов. Горизонтальным лучом со сквозным проплавлением сваривают металлы толщиной до 400 мм.

Конструкция соединения для однопроводной ЭЛС выполняется с учетом глубокого проникновения луча в металл (рис. 3.4). Толщина зазора в стыке составляет 0,1...0,2 мм при глубине шва менее 20...30 мм и 0,3 мм при глубине шва свыше 30 мм. В общем случае зазор должен быть меньше диаметра луча.

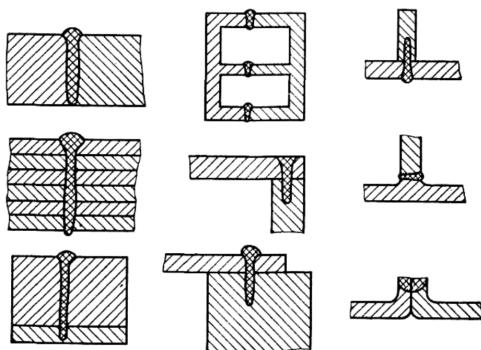


Рис. 3.4. Типы конструкций стыка при ЭЛС

При ЭЛС используют ряд технологических приемов для улучшения качества шва:

- сварку наклонным лучом (отклонение в направлении перемещения на  $5...7^\circ$ ) для уменьшения пор и несплошностей и создания более равномерных условий кристаллизации;
- сварку с присадкой для легирования металла шва или восстановления концентрации легкоиспаряющихся в вакууме элементов;
- сварку на дисперсной подкладке для улучшения выхода паров и газов из канала (подкладка толщиной  $\sim 40$  мм из гранул или рубленой сварочной проволоки);

– сварку в узкую разделку (0,8...8 мм) в нижнем положении за счет наплавки присадки в прямоугольную разделку кромок;

– тандемную сварку двумя электронными пушками, из которых одна осуществляет проплавление, а вторая (меньшей мощности) формирует либо корень канала, либо хвостовую часть ванны. При квазитандемной сварке используют один луч, периодически отклоняя его, например, в хвост ванны, получают практически два луча;

– предварительные проходы для проверки позиционирования луча и очистки и обезгаживания кромок свариваемых металлов;

– двустороннюю сварку одновременно или последовательно двух противоположных сторон стыка примерно на половину толщины стыка. Одновременную двустороннюю сварку осуществляют как с общей ванной, так и с раздельными;

– развертку электронного луча: продольную, поперечную, Х-образную, круговую, по эллипсу, дуге и т. п. с амплитудой порядка диаметра луча и частотами до 1...2 кГц для создания более благоприятных газо- и гидродинамических условий формирования канала (резонансные режимы нагрева). Двойное преломление луча в процессе развертки позволяет, например, расширить корневую часть канала, что необходимо для подавления корневых дефектов;

– расщепление луча (за счет отклоняющей системы) для одновременной сварки двух и более стыков (точек);

– модуляцию тока луча (обычно с частотой 1...100 Гц) для управления тепловложением в сварной шов;

– «косметическое» заглаживание – повторный проход для ремонта видимых дефектов шва как с внешней, так и с внутренней сторон. В некоторых случаях «косметические» проходы осуществляют с присадкой.

### **3.6. Оборудование для ЭЛС**

#### ***3.6.1. Классификация и состав электронно-лучевых установок***

По степени специализации электронно-лучевые установки делятся на универсальные и специализированные, а по давлению в рабочей камере – на высоковакуумные (давление в камере менее  $10^{-1}$  Па), промежуточного вакуума (давление в камере  $10... 10^{-1}$  Па) и установки для ЭЛС в атмосфере или в защитном газе ( $10^3... 10^5$  Па).

По принципу создания вакуума в зоне сварки электронно-лучевые установки делятся на камерные (изделие внутри рабочей камеры) и с локальным вакуумированием (герметизация изделия осуществляется только в зоне сварки).

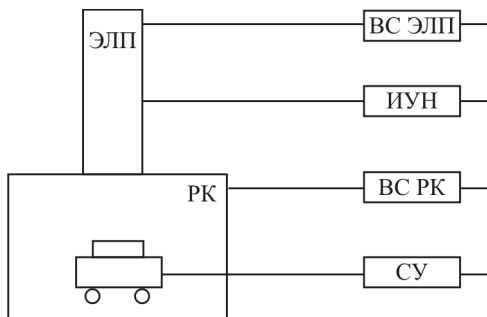


Рис. 3.5. Структура электронно-лучевой установки: ЭЛП – электронно-лучевая пушка; РК – рабочая камера; ВС ЭЛП – вакуумная система электронно-лучевой пушки; ИУН – источник ускоряющего напряжения; ВС РК – вакуумная система рабочей камеры установки; СУ – система управления установкой

В состав любой электронно-лучевой установки (рис. 3.5) входят: электронно-лучевая пушка (ЭЛП); источник питания ЭЛП; вакуумная система; система управления.

### ***3.6.2. Электронно-лучевые пушки***

Электронно-лучевые пушки (ЭЛП) служат для генерации и формирования электронного луча. Основные узлы ЭЛП – генератор электронов и система проведения луча (рис. 3.6). Генератор электронов состоит из катода, управляющего электрода, или электрода Венельта, анода. Система проведения луча включает юстирующие, фокусирующие и отклоняющие катушки.

Катоды ЭЛП выполняются накальными (термокатоде прямого или косвенного накала) или плазменными. Материал термокатодов – вольфрам, тантал, сплавы этих металлов с рением, гексаборид лантана ( $LaB_6$ ). В термокатадах прямого нагрева нагрев осуществляется за счет пропускания через катод тока накала, а в термокатадах косвенного нагрева – за счет бомбардировки катода электронами от вспомогательного катода.



Материал высоковольтного изолятора – керамика, стекло, специальные пластмассы. Типичные материалы для анода и управляющего электрода – нержавеющая сталь, медь.

Ускоряющее напряжение приложено между анодом и катодом. Управление током луча осуществляется, как правило, путем изменения потенциала управляющего электрода по отношению к катоду.

В настоящее время выпускаются ЭЛП мощностью от 1 до 300 кВт с ускоряющим напряжением 25...150 кВ. Основными изготовителями являются Германия, Франция, Великобритания, США, Япония.

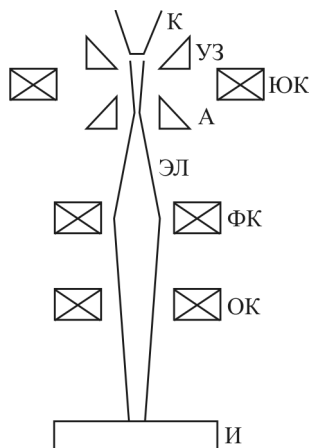


Рис. 3.6. Структура электронно-лучевой пушки: К – катод; УЭ – управляющий электрод; ЮК – юстирующая катушка; А – анод; ЭЛ – электронный луч; ФК – фокусирующая катушка; ОК – отклоняющие катушки; И – свариваемое изделие

### 3.6.3. Источники питания ЭЛП

Источники питания ЭЛП состоят из источника ускоряющего напряжения, а также источников питания управляющего электрода, накала катода, фокусирующей и отклоняющей систем.

Источники ускоряющего напряжения выполняются с регулирующим элементом на первичной или вторичной стороне высоковольтного трансформатора, с преобразованием или без преобразования частоты питающего напряжения.

Регулировку на первичной стороне осуществляют тиристорными или транзисторными регуляторами, на вторичной стороне – специальной высоковольтной лампой.

Для защиты от пробоев в ЭЛП источники ускоряющего напряжения обычно снабжаются устройствами автоматического повторного включения. Это позволяет без заметного ухудшения качества сварки проводить ЭЛС даже в условиях частых пробоев. Конструктивно источники ускоряющего напряжения размещают в баке с трансформатора

торным маслом, которое одновременно выполняет функции охлаждающей среды. Известны также источники ускоряющего напряжения, рассчитанные на напряжение до 60 кВ, в которых в качестве изолирующей среды используется воздух или компаунды.

Для гальванического разделения в источнике питания управляющего электрода используют высокочастотные трансформаторы или пару светодиод/фототранзистор, соединенную световодом. Для обеспечения постоянства характеристик системы проведения электронного луча питание катушек фокусирующей, юстирующей и отклоняющей систем осуществляется от регуляторов тока.

### 3.6.4. Вакуумная система электронно-лучевой установки

Вакуумная система электронно-лучевой установки (рис. 3.7) служит для создания необходимого давления в ЭЛП и рабочей камере: как правило,  $10^{-2} \dots 10^{-4}$  Па в ЭЛП и  $10 \dots 10^{-3}$  Па в рабочей камере. ЭЛП отсекается от рабочей камеры с помощью специального вакуумного клапана, который открывается на время проведения сварки.

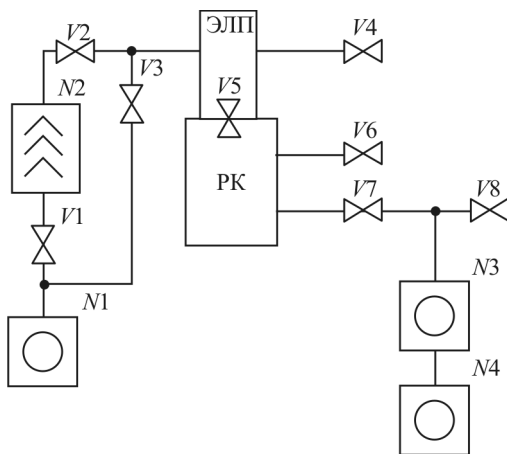


Рис. 3.7. Схема вакуумной системы электронно-лучевой сварочной установки: N1 – механический насос ЭЛП; N2 – высоковакуумный насос ЭЛП; N3 – двухроторный механический насос; N4 – золотниковый или пластинчато-роторный насос; V1 – клапан откачки высоковакуумного насоса; V2 – клапан откачки ЭЛП высоковакуумным насосом; V3 – клапан откачки ЭЛП механическим насосом; V4 – клапан напуска воздуха в полость электронной пушки; V5 – клапан отсечки ЭЛП; V6 – клапан напуска воздуха в рабочую камеру (ПК); V7 – клапан откачки рабочей камеры; V8 – клапан напуска воздуха в насосы рабочей камеры

В качестве механических насосов с предельным давлением 0,1...10 Па используются шибберные или золотниковые насосы и агрегаты на их основе, в состав которых включаются также двухроторные насосы (насосы Рутса). В качестве высоковакуумных насосов используются паромасляные или турбомолекулярные насосы.

### ***3.6.5. Система управления электронно-лучевой установкой***

Система управления (СУ) должна выполнять следующие основные функции:

- программное управление работой всех систем установки;
- диагностику работы всех систем установки;
- контроль и управление положением электронного луча по отношению к стыку;
- связь с СУ более высокого уровня при работе в составе производственной системы.

### ***Контрольные вопросы***

1. Какова сущность процесса нагрева металла электронным пучком?
2. Каковы параметры и показатели электронно-лучевой сварки?
3. Как обеспечивается вакуумная защита процесса электронно-лучевой сварки?
4. Из каких составных частей состоит установка для электронно-лучевой сварки?
5. Какова роль канала проплавления, образуемого в металле при электронно-лучевой сварке с высокой мощностью электронного пучка?
6. Каков характер специфических дефектов при электронно-лучевой сварке с высокой удельной мощностью электронного пучка?
7. Каково устройство сварочной электронно-лучевой пушки?

## 4. ДИФфуЗИОННАЯ СВАРКА

### 4.1. Общие сведения о диффузионной сварке

В основе технологии диффузионной сварки (ДС) лежит способ, разработанный профессором Н. Ф. Казаковым в 1953 г. Диффузионная сварка относится к классу термомеханических процессов. Она широко применяется в электронной, электротехнической, автомобильной, авиационной промышленности, а также в энергетическом, химическом машиностроении и других отраслях техники. От общего объема механизированных способов сварки на долю диффузионной сварки вместе с другими специальными способами (например, радиочастотной, электронно-лучевой) приходится 5...10 %.

Наиболее широкое применение среди технически развитых стран этот способ сварки находит в нашей стране, а также в Японии, США, Франции, Великобритании, Германии.

#### *4.1.1. Терминология и основные схемы диффузионной сварки*

Диффузионная сварка входит в группу способов сварки давлением, при которых соединение происходит за счет пластической деформации свариваемых частей при температуре ниже температуры плавления, т. е. в твердой фазе. Отличительной чертой является применение повышенных температур при сравнительно небольшой остаточной деформации.

Процесс может осуществляться с использованием большинства тепловых источников, известных при сварке. В основном применяется на практике индукционный, радиационный, электронно-лучевой нагрев, а также нагрев проходящим током, тлеющим разрядом и нагрев в расплаве солей.

Контакт соединяемых деталей при сварке выполняется либо непосредственно, либо через прослойки (фольговые или порошковые прокладки, покрытия).

Чаще всего ДС проводят в вакууме. Однако принципиально возможно осуществление процесса в атмосфере защитных или восстановительных газов или их смесей (диффузионная сварка в контролируе-

мой атмосфере). При сварке материалов, имеющих относительно малое сродство к кислороду, процесс можно вести даже на воздухе. В качестве среды для диффузионной сварки могут быть использованы и расплавы солей, выполняющие одновременно роль источника тепла.

В практике диффузионной сварки известно применение двух технологических схем процесса, различающихся характером приложения нагрузки или напряжения, действующих в течение цикла. В одной из них используют постоянную нагрузку (рис. 4.1, а) по величине ниже предела текучести. При этом процессы, развивающиеся в свариваемых материалах, аналогичны ползучести. Такую технологию называют диффузионной сваркой по схеме свободного деформирования. На практике такая схема осуществима наиболее просто, поэтому очень широко распространена.

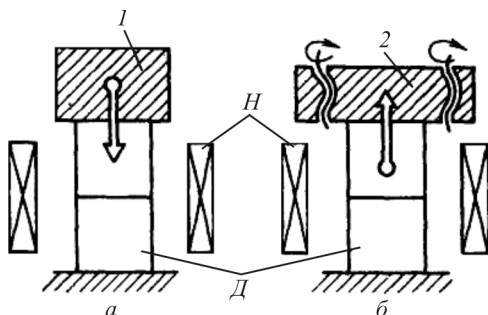


Рис. 4.1. Схема деформирования при диффузионной сварке:  
 1 – система нагружения; 2 – система деформирования;  
 Н – нагреватель; Д – детали

По другой схеме нагрузка и пластическая деформация обеспечиваются специальным устройством, перемещающимся в процессе сварки с контролируемой скоростью (рис. 4.1, б). Такую технологию называют диффузионной сваркой по схеме принудительного деформирования (ДСПД).

#### 4.1.2. Технологические возможности и ограничения

С помощью диффузионной сварки сравнительно легко могут быть получены соединения большинства конструкционных материалов: металлов и сплавов на их основе – как в однородных, так и в разно-

родных сочетаниях, включая материалы с резко различающимися свойствами (например, металл и керамика). В однородных сочетаниях структура и свойства сварного соединения практически не отличаются от основного материала. При соединении разнородных пар, а в некоторых случаях и для однородных сочетаний могут быть использованы промежуточные прослойки.

Особенностью ДС является возможность ограничения общей деформации соединяемых деталей, что позволяет получать прецизионные соединения, в необходимых случаях не требующие последующей механической обработки.

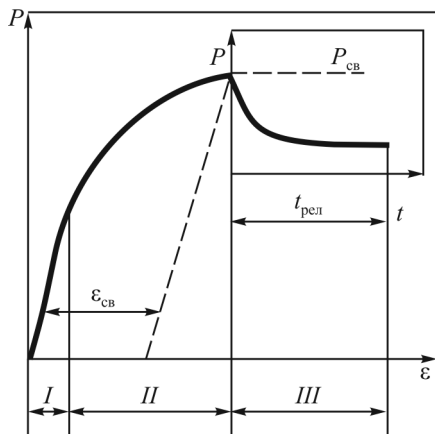


Рис. 4.2. Диаграмма деформирования при ДСПД:  $t_{рел}$  – время релаксации;  $\epsilon_{св}$  – степень накопленной деформации;  $P_{св}$  – величина давления при сварке

При диффузионной сварке по схеме принудительного деформирования (ДСПД) (рис. 4.2) цикл сварки можно четко ограничить макроупругой стадией I или прекратить в любой момент стадии пластического деформирования II, а также на стадии выдержки в режиме релаксации напряжений III, когда приращения пластической деформации практически не происходит.

Для управления структурой и свойствами сварного соединения и основного материала при диффузионной сварке сравнительно легко могут быть использованы принципы термомеханической обработки, совмещенные с циклом сварки, особенно при сварке с принудительным деформированием.

При изготовлении тонкостенных многослойных и пространственных конструкций типа пустотелых панелей решеток, облегченных ферм и т. п. процесс сварки может быть совмещен с формообразованием. В серийном производстве простых по форме изделий за один технологический цикл можно соединять одновременно несколько деталей (пакетная сварка). При этом сварочный процесс сравнительно легко автоматизируется и в случае применения конвейерных комплектов, работающих по принципу шлюзования, обеспечивается высокая производительность.

Технология может быть использована в производстве полуфабрикатов и заготовок для последующей обработки. Например, этим методом получают многослойные заготовки для последующей прокатки, а также крупногабаритные заготовки сложной формы путем соединения простых элементов, что приводит к существенной экономии материала.

Следует отметить ограничения в применении и недостатки технологии:

- в большинстве случаев длительность цикла сварки значительна, что ограничивает производительность процесса;
- сложность оборудования (особенно вакуумного) и технологической оснастки, подвергающейся одновременному нагреву и нагружению, предъявляет высокие требования к техническому уровню производства;
- размеры изделий, как правило, ограничиваются типом применяемых сварочных установок;
- высокие требования к качеству контактных поверхностей удорожают процесс в целом;
- известные методы неразрушающего контроля в связи со спецификой дефектов сварных швов имеют сравнительно низкую эффективность.

## **4.2. Технология ДС**

### ***4.2.1. Типы и конструкции соединений***

При диффузионной сварке могут быть использованы все типы соединений, известные в практике сварки и пайки (рис. 4.3). При этом основным условием является возможность обеспечения плотного и свободного прилегания соединяемых поверхностей по всей площади касания.

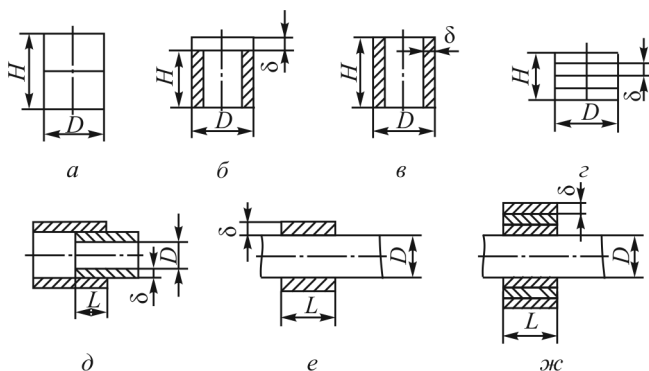


Рис. 4.3. Варианты соединений при диффузионной сварке: *a* – массивные детали ( $H/D < 6$ ) (соединение по торцевой поверхности); *б* – листовые элементы и массивная деталь ( $H/\delta < 10$ ); *в* – трубки, соединяемые по концу ( $\delta/D > 0,2$ ;  $H/D < 6$ ); *г* – многослойный пакет ( $\delta/D > 0,2$ ;  $H/D < 6$ ); *д* – цилиндрические поверхности ( $L/D < 5$ ); *е* – то же ( $0,5 < L/D < 5$ ;  $\delta > 0,05$ ); *ж* – то же для многослойной заготовки ( $0,5 < L/D < 5$ ;  $\delta > 0,05$ )

Поскольку деформация свариваемых деталей в большинстве случаев ограничена, в случае повышенных требований к механическим свойствам предпочтительным является применение механической обработки зоны соединения после сварки с целью удаления краевых дефектов (непроваров) или для получения более целесообразной геометрии соединения в случае тавровых и угловых швов (например, для формирования радиуса в зоне концентратора напряжений).

Элементы сварных узлов, к которым предъявляются наиболее высокие требования по вакуумной плотности, рекомендуется изготавливать таким образом, чтобы волокна текстуры материала начинались и заканчивались в пределах вакуумной полости или сварного соединения.

#### 4.2.2. Подготовка поверхности

Свариваемые поверхности должны быть обработаны до шероховатости  $R_a < 1,25$  мкм. Предпочтительно применение механической обработки.

Непосредственно перед сваркой детали проходят очистку от жировых и других загрязнений, а также от оксидов методами электрохимической или химической обработки (травление, обезжиривание, электрополировка). Такой же обработке подвергают промежуточные



прокладки из фольги, если они применяются. Эффективно использование электрического разряда для очистки поверхности непосредственно в рабочей камере перед сваркой.

#### ***4.2.3. Применение покрытий и промежуточных прокладок***

Покрытия наносят чаще всего гальваническим, химическим или термовакuumным методом на одну или обе свариваемые детали, но, как правило, только в пределах площади их контактирования. При сварке мелких деталей допускается нанесение покрытия на всю поверхность. Покрытия применяют для защиты от окисления в процессе нагрева при сварке сплавов, в состав которых входят активные по отношению к кислороду элементы (Cr, Al и др.). Чаще всего используют никелевое, медное или серебряное покрытие толщиной 5...10 мкм.

При сварке материалов, образующих в контакте при температуре процесса интерметаллидные фазы, необходимо применение барьерных прослоек. Для этого могут быть использованы покрытия достаточной толщины, а также фольговые прокладки, изготавливаемые по форме площади контактирования. В этом случае основное требование при выборе типа покрытия или прокладки – совместимость с каждым из свариваемых сплавов. При необходимости прокладки могут быть многослойными или применяться в сочетании с покрытиями.

Сравнительно толстые (100...500 мкм) фольговые прокладки из пластичных металлов (Ni, Cu, Ti, Al и др.) применяют с целью интенсификации пластической деформации в контактной зоне. Необходимость этого возникает в случае, когда соединяемые материалы имеют ограниченную деформационную способность в интервале режимов сварки (керамика, жаропрочные сплавы), а также когда контактирующие поверхности грубо обработаны или плохо взаимно сопрягаются.

Той же цели достигают применением порошковых прокладок, изготовленных предварительным формованием в виде закладных элементов (лент, шайб, таблеток) из промышленных порошков никеля, меди, титана и др. (размер частиц 50...100 мкм), а также из специальных ультрадисперсных порошков (частицы размером менее 1 мкм). В последнем случае применение прослоек позволяет существенно снизить температуру диффузионной сварки.

Толстые промежуточные прослойки необходимы также в случае, когда соединяемые материалы в разнородной паре имеют сильно различающееся тепловое расширение в температурном интервале режимов сварки. Такие прокладки компенсируют за счет пластической деформации остаточные напряжения в соединении, возникающие при охлаждении, и предупреждают самопроизвольное разрушение конструкции.

Особое место в технологии ДС занимают расплавляющиеся прослойки. Жидкая фаза в зоне соединения образуется за счет применения прослоек, имеющих температуру плавления ниже температуры плавления свариваемых материалов (чаще в результате протекания эвтектической реакции или непосредственно между свариваемыми материалами, или между ними и специально введенной прослойкой), такие прослойки применяют в виде покрытий, фольг и порошковых смесей, а также в любом их сочетании.

Наличие жидкой фазы в зоне контакта позволяет ограничить деформирующую нагрузку, снизить температуру сварки, активизировать процесс формирования контакта, что важно, например, при соединении труднодеформируемых жаропрочных сплавов, керамик, сложнолегированных сплавов и других материалов.

Для повышения жаропрочности и коррозионной стойкости сварных соединений в этом случае целесообразно применять послесварочный гомогенизирующий отжиг для выравнивания химического состава в зоне контакта.

#### ***4.2.4. Предохранение от приваривания к оснастке***

Для предохранения от приваривания к оснастке при диффузионной сварке применяют покрытия на основе оксида алюминия или смесей, замешиваемых на акриловой смоле, поливиниловом спирте, бензоле, ацетоне и других растворителях.

В качестве изолирующих прокладок могут быть использованы слюда, карбонитрид бора, керамики, волокнистые термостойкие тканые материалы или стеклоткани. Последние удобны при сварке деталей сложной формы и могут быть заранее раскрыты. После сварки остатки такой прокладки счищают щеткой.

Для предупреждения приваривания оснастку из нержавеющей стали оксидируют отжигом в водороде с точкой росы от  $-20$  до  $+10$  °С при температуре  $900...950$  °С.

#### 4.2.5. Выбор параметров режима

В зависимости от свойств свариваемых материалов степень разрежения в вакуумной камере выбирается в диапазоне  $1,3 \dots 1,3 \cdot 10^{-4}$  Па. При сварке малоуглеродистых сталей, меди, никеля требования к остаточному давлению наименее жесткие. Присутствие в сплавах хрома, алюминия, титана, вольфрама и других активных элементов приводит к необходимости снижения остаточного давления в пределах указанного диапазона в тем большей степени, чем выше активность элемента и его содержание в сплаве.

В качестве контролируемых атмосфер применяют осушенные аргон или гелий, очищенные и осушенные водород, азот или смесь азота с 6...8 % водорода.

На воздухе сваривают малоуглеродистые и некоторые инструментальные стали. При этом контактные поверхности заготовок после механической обработки защищают от окисления консервирующим покрытием: эпоксидной смолой или глицерином. При нагреве зоны стыка в процессе сварки покрытие выгорает без остатка, а образующиеся газы защищают зону сварки от окисления.

Состав соляных ванн для диффузионной сварки определяется необходимой температурой, например 850...870 °С при использовании расплава NaCl; 1000...1150 °С для BaCl<sub>2</sub>; 700...950 °С для смеси 70 % BaCl<sub>2</sub> + 30 % KCl.

При сварке по схеме свободного деформирования (см. рис. 4.1, а) основными параметрами являются температура  $T$ , давление  $P$ , время выдержки  $t$  (или степень остаточной деформации  $\epsilon_{св}$ ). Указанные параметры являются взаимозависимыми величинами, в разной степени влияющими на прочность сварного соединения. Поэтому оптимальные их значения обычно устанавливают экспериментально.

В ряде случаев перед сваркой рекомендуется проведение термической обработки деталей, в том числе в активных газовых средах (вакуум, водород). Целью обработки является стабилизация структуры материала, а также исходного состояния контактных поверхностей, что заметно улучшает свариваемость.

Температуру сварки выбирают в диапазоне (0,7...0,8)  $T_{пл}$ , иногда несколько ниже, до 0,5  $T_{пл}$  (здесь  $T_{пл}$  – температура плавления свариваемого материала). Для тугоплавких и жаропрочных материалов температура может быть выше указанного диапазона.

Скорости нагрева и охлаждения зависят от источника тепла, и в большинстве случаев их не регламентируют. При сварке разнородных сочетаний материалов, термический коэффициент линейного расширения которых различается более чем на  $2 \cdot 10^{-6}$  град<sup>-1</sup>, скорость охлаждения целесообразно уменьшать до 10...15 °С/мин.

Разгерметизацию камеры при сварке деталей из черных металлов рекомендуют проводить при температуре не выше 120 °С, а из цветных и активных металлов – при 60 °С.

Давление выбирают в диапазоне 0,8...0,9 предела текучести при температуре сварки. Для известных конструкционных материалов оно может изменяться в диапазоне 1...100 МПа.

Время выдержки в зависимости от температуры, давления, допустимой остаточной деформации, чистоты обработки контактных поверхностей и деформационной способности материала может колебаться от нескольких секунд до нескольких часов (чаще 5...10 мин).

При ДСПД (см. рис. 4.1, б) основными параметрами являются: температура  $T$ , скорость роста нагрузки  $\dot{P}$ , скорость деформирования  $\dot{\epsilon}$ , время деформирования  $t$  (или степень накопленной деформации  $\epsilon_{\text{св}}$ ), время выдержки в режиме релаксации  $t_{\text{рел}}$ . Соппротивление деформированию  $P$  в этом случае является зависимым параметром. Его величина, а также  $\epsilon_{\text{св}}$  регистрируются непосредственно в течение всего цикла сварки в виде диаграммы. Оба параметра могут быть использованы для контроля и управления качеством соединения.

#### **4.2.6. Пути интенсификации процесса диффузионной сварки**

Повышения производительности процесса добиваются, главным образом, усовершенствованием сварочного оборудования в направлении сокращения наиболее длительных этапов цикла сварки – вакуумирования, нагрева, охлаждения. С этой целью используют многопозиционные приспособления, многокамерные установки, а также автоматические конвейерные системы.

Под интенсификацией процесса формирования соединения подразумевается сокращение времени выдержки при сварке, снижение температуры процесса, повышение эксплуатационных свойств сварного шва.

Применение пластичных, расплавляющихся и порошковых промежуточных прослоек позволяет снизить температуру процесса, в некоторых случаях существенно. Известны приемы создания пластичного при-

поверхностного слоя, облегчающего смятие микровыступов в контакте и активацию поверхностей. Например, при сварке титановых сплавов это достигается легированием зоны соединения  $\beta$ -стабилизаторами. Применительно к сталям пластичный слой создают за счет предварительного обезуглероживания при высоких температурах. Высокопрочные никелевые сплавы перед сваркой обрабатывают в смеси газов: 40...30 % He, 70...90 % H<sub>2</sub>. Температура обработки 1100...1300 °С, выдержка 10...30 ч.

Активировать диффузионные процессы в приконтактных слоях при сварке тугоплавких и разнородных материалов можно предварительной электроэрозионной обработкой поверхностей. Это позволяет снизить температуру сварки и исключить образование интерметаллидов.

При сварке диэлектриков с металлами (например, стекла с металлом) применяют электрическое поле высокого напряжения, позволяющее в результате действия электроадгезионного эффекта существенно снизить температуру сварки и уменьшить остаточные напряжения в стекле.

Для интенсификации пластической деформации за счет активации диффузионных процессов применяется циклическое изменение температуры. При сварке сплавов, испытывающих полиморфное превращение, термоциклирование проводят вблизи интервала превращения.

Термодеформационный цикл при ДСПД осуществляется под непрерывным контролем, поэтому возникает возможность обеспечить строгую согласованность всех его этапов. Использование сложных циклов нагружения, деформирования и разгрузки после сварки, назначенных с учетом деформационной способности свариваемых материалов, а также состояния контактных поверхностей, позволяет активно управлять процессом формирования соединения и его свойствами.

### **4.3. Технологическая оснастка и оборудование**

Практическое применение ДС в производстве связано в большинстве случаев с использованием специального технологического оборудования (установки для диффузионной сварки), при необходимости укомплектованного дополнительными приспособлениями.

#### ***4.3.1. Основные типы приспособлений***

Сдавливание и деформирование деталей при ДС проводят прикладывая усилие перпендикулярно поверхности контактирования. Наиболее просто это осуществляется при плоских свариваемых поверхностях, которые следует считать предпочтительными. В этом случае усилие, как

правило, передается непосредственно или через приспособление (рис. 4.4) от рабочих пуансонов сварочной машины к деталям. Для взаимного фиксирования свариваемых элементов предварительно выбирают рациональную конструкцию или простейшие средства с тем, чтобы по возможности обойтись без дополнительных приспособлений, которые усложняют сборку, увеличивают нагреваемую массу металла, кроме того, при этом возможно схватывание деталей с оснасткой.

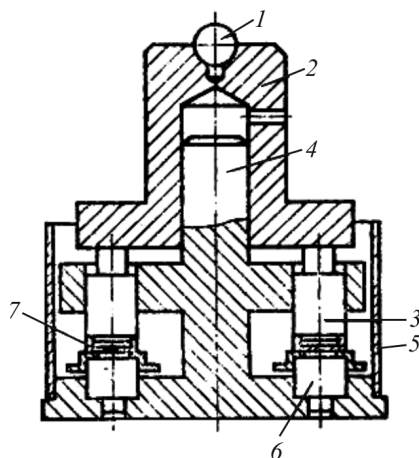


Рис. 4.4. Типовая конструкция простейшего многоместного приспособления для диффузионной сварки: 1 – шарик; 2 – прижим; 3 – пуансон; 4 – корпус; 5 – тепловой экран; 6 – центрирующая оправка; 7 – свариваемые детали

Фиксировать свариваемые элементы можно с помощью технологических уступов, проточек, буртиков для фиксирования, которые после сварки могут удаляться механической обработкой. Во всех случаях основным требованием правильной сборки является свободное прилегание свариваемых поверхностей.

Применительно к деталям сложной формы (например, телескопические конструкции) для создания давления чаще всего применяют метод термонатяга (рис. 4.5). Метод термонатяга может быть использован и при сварке сравнительно простых по форме деталей в сочетании с многоместными приспособлениями (рис. 4.6), что существенно повышает производительность и упрощает технологию. В обоих случаях для нагрева пригодны универсальные вакуумные печи или печи с контролируемой

атмосферой, в том числе шлюзовые и конвейерные. При расчете основных размеров приспособлений исходят из требуемого для сварки удельного давления и разницы температурных коэффициентов линейных расширений свариваемых материалов и стягивающих элементов оснастки.

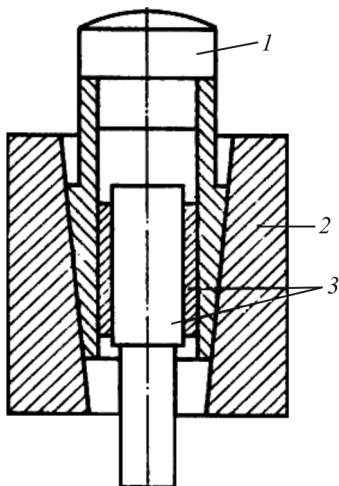


Рис. 4.5. Приспособление для сварки охватывающих соединений с использованием термонатяга: 1 – конусный пуансон; 2 – оправка; 3 – свариваемые детали

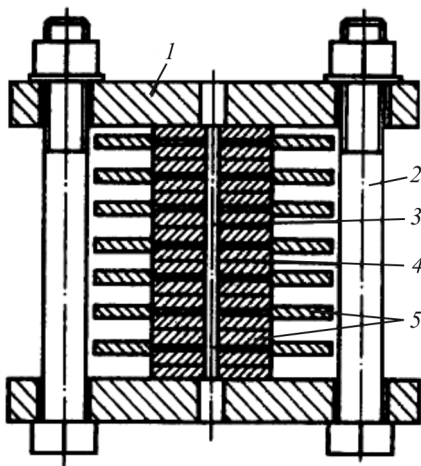


Рис. 4.6. Приспособление для пакетной диффузионной сварки с использованием термонатяга: 1 – фланец; 2 – стяжной болт; 3 – центрирующее отверстие; 4 – компенсирующие прокладки; 5 – свариваемые детали

Для изготовления деталей приспособлений рекомендуются высокохромистые стали и сплавы (например, 0X27Ю5А, X25Н20, X20Н80, 12X18Н10Т, 12X13, 20X13), молибден (МРН и др.), графит (МПГ-Б, МПГ-7). Приспособления из графита перед использованием отжигают в вакууме при 1300 °С.

#### 4.3.2. Герметизируемые контейнеры

Применение диффузионной сварки крупногабаритных деталей сдерживается отсутствием специализированного оборудования. В связи с этим для практики представляют интерес технические решения, предполагающие использование стандартного прессового оборудования. Свариваемые заготовки предварительно укладывают в тонкостенный контейнер, изготовленный по форме собранного узла. Контейнер герметизируют, обваривая по периметру, и после вакуумирования внутренней полости осуществляют нагрев и сжатие заготовок с помощью пресса, оснащенного сравнительно простыми нагревательными элементами (рис. 4.7).

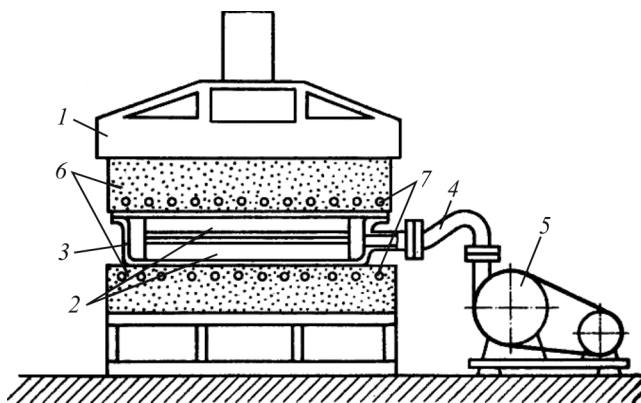


Рис. 4.7. Диффузионная сварка в герметичном контейнере: 1 – плита пресса; 2 – свариваемые детали; 3 – контейнер; 4 – вакуумная трубка; 5 – вакуумный насос, 6 – нагревательные плиты; 7 – нагреватели

В некоторых случаях герметизируют пространство только между соединяемыми поверхностями. Для этого обваривают детали по периметру контактных поверхностей непосредственно или с использованием специальных манжет из жаропрочного сплава или гофрированных элементов.



### **4.3.3. Универсальные установки**

Установки для ДС в общем случае имеют рабочую камеру, механизм для создания сварочного давления или деформирования, систему для получения рабочей среды (вакуума или газовой среды), аппаратуру управления и контроля. Применяемое на практике оборудование имеет большое разнообразие конструктивных решений функциональных узлов и систем, обусловленное, главным образом, габаритами свариваемых узлов, степенью их прецизионности, применяемыми материалами и необходимой производительностью. Эти требования определяют в основном выбор систем нагрева, вариантов рабочей среды, нагружения или деформирования.

В общем случае наиболее интересные технические решения направлены на повышение производительности универсальных установок. С этой целью применяют принципы создания многокамерных комплексов или полностью автоматизированных конвейерных систем.

В установках типа УДСПД, разработанных для реализации принципов контролируемого нагружения и деформирования, в качестве системы нагружения используются силовые элементы универсальных испытательных машин.

В связи с современной тенденцией применения диффузионной сварки для изготовления крупногабаритных изделий сложной формы проводятся работы по созданию крупногабаритных установок модульного типа. Модуль такой установки снабжен автономными системами вакуумирования, нагрева и сжатия. В зависимости от размеров свариваемой конструкции монтируется необходимое количество модулей. Отдельная задняя стенка и передняя сдвижная дверца ограничивают в целом рабочее пространство установки. Конструкция модулей предусматривает возможность изменения рабочего пространства в вертикальном направлении.

### **4.3.4. Газостаты**

Современные газостаты (рис. 4.8) могут с успехом применяться для диффузионной сварки, особенно деталей сложной формы из однородных и разнородных материалов, когда обеспечить равномерное давление материалов по сопрягаемым поверхностям трудно или невозможно.

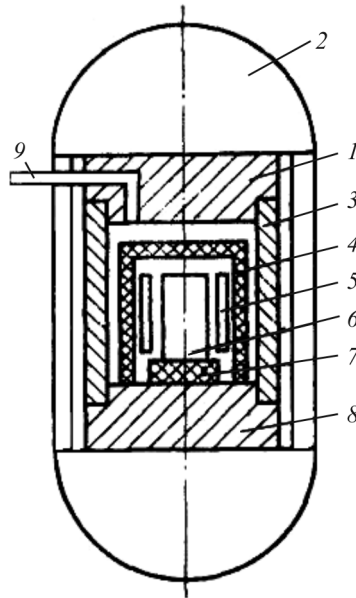


Рис. 4.8. Схема высокотемпературного газостата, используемого для диффузионной сварки: 1 – верхняя пробка; 2 – станина; 3 – контейнер; 4 – термоизоляционный колпак; 5 – нагреватель; 6 – свариваемая деталь; 7 – термоизолятор; 8 – нижняя пробка; 9 – трубопровод подачи рабочего газа

В большинстве случаев перед сваркой детали укладывают в тонкостенные технологические оболочки (конверты) и герметизируют сваркой. После этого сборку помещают в рабочую камеру газостата и проводят высокотемпературную обработку в течение нескольких часов давлением газа более 100 МПа (рис. 4.9).

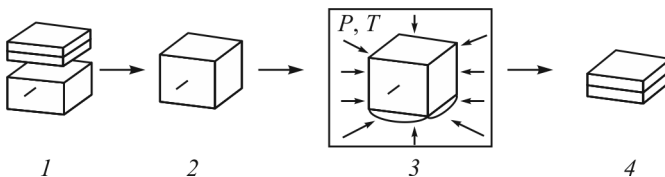


Рис. 4.9. Схема диффузионной сварки с использованием горячего изостатического прессования: 1 – сборка в контейнере; 2 – герметизация контейнера; 3 – высокотемпературная обработка в газостате; 4 – сваренный узел

Метод горячей изостатической обработки оказался эффективным также для улучшения свойств соединений, выполненных диффузионной сваркой. В частности, его можно использовать для залечивания дефектов в виде пустот, что способствует существенному повышению пластичности сварного соединения.

#### **4.4. Промышленное применение ДС**

##### ***4.4.1. Приборостроение***

Характерной особенностью конструкций современных приборов и узлов электронной техники является применение прецизионных элементов, изготовленных из разнородных материалов, в том числе неметаллических (стекло, керамика и др.). Технологические возможности диффузионной сварки позволяют широко использовать этот процесс в промышленности при создании металлокерамических узлов, катодных узлов, вакуум-плотных соединений из разнородных материалов, полупроводниковых систем и др. Большинство известных в настоящее время разработок в области технологии и оборудования для диффузионной сварки сделано именно в приборостроении.

##### ***4.4.2. Крупногабаритные заготовки и полуфабрикаты***

Диффузионная сварка находит применение для изготовления крупногабаритных заготовок деталей сложной формы, получение которых механической обработкой, методами обработки давлением или литьем невозможно или неэкономично. При этом путем соединения простых по форме элементов, изготовленных из стандартных полуфабрикатов, можно существенно повысить коэффициент использования металла (КИМ), а в ряде случаев получить сложные заготовки из разнородных материалов, которые практически невозможно изготовить другими методами сварки. Особенно эффективно такое применение диффузионной сварки в опытном и мелкосерийном производстве.

При этом чаще всего используются открытые прессы в сочетании с герметизированными контейнерами (рис. 4.10).

С помощью диффузионной сварки получают крупногабаритные толстые многослойные заготовки, из которых затем изготавливают прокаткой слоистые композиционные листы.

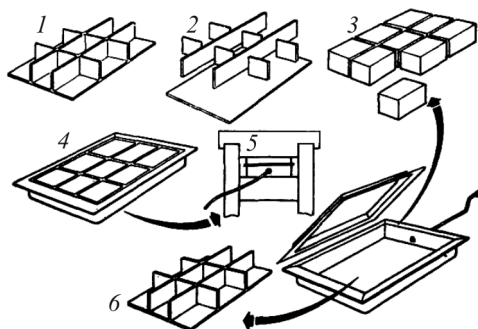


Рис. 4.10. Схема диффузионной сварки крупногабаритной заготовки ребристой панели: 1 – внешний вид панели; 2 – составные элементы; 3 – детали оснастки; 4 – сборка в контейнере; 5 – сварка с использованием открытого прессы; 6 – сваренная заготовка

#### 4.4.3. Совмещение сварки с формообразованием

Многослойные тонкостенные конструкции типа панелей из титановых или алюминиевых сплавов с наполнителем сложной формы (гофры, соты, ребра и др.) получают методом совмещения диффузионной сварки и формообразования в режиме сверхпластичности (рис. 4.11).

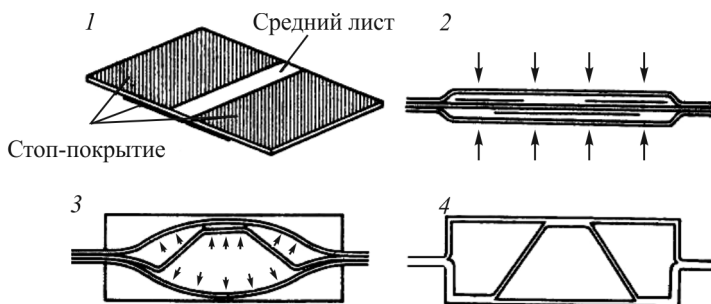


Рис. 4.11. Схема получения многослойной панели методом совмещения диффузионной сварки с формообразованием: 1 – подготовка к сварке; 2 – сварка пакета; 3 – формование панели; 4 – окончательная форма детали

Листовые заготовки сложной панели предварительно сваривают в необходимых местах в плоском пакете. С этой целью на поверхность листов перед сборкой пакета наносят барьерное покрытие. Собранный пакет герметизируют по контуру, вакуумируют и осуществляют диф-

фузионную сварку, а затем во внутреннюю полость подается газ или жидкость, заготовка раздувается и принимает форму внутренней поверхности матрицы.

#### **4.5. Контроль качества сварного соединения при ДС**

Основными типами дефектов сварного соединения являются: непровар, т. е. отсутствие соединения в отдельных участках контакта (дефекты 1-го типа), мелкие сферические поры, расположенные в теле общих зерен, которые образовались в зоне контактирования (дефекты 2-го типа), и плоскоориентированная межфазная граница.

Особенностью дефектов является то, что они располагаются вдоль бывшей поверхности контактирования, а величина раскрытия непроваров, размеры пор, как правило, невелики. Это затрудняет применение традиционных неразрушающих методов для их выявления. Наиболее перспективными методами неразрушающего контроля являются ультразвуковые методы, а также метод акустической эмиссии.

#### ***Контрольные вопросы***

1. Какова сущность процесса диффузионной сварки в вакууме?
2. Каковы технологические возможности диффузионной сварки в вакууме?
3. Каким образом осуществляется подготовка поверхностей свариваемых деталей?
4. Как выбираются параметры режима диффузионной сварки в вакууме?
5. Каковы пути интенсификации процесса диффузионной сварки в вакууме?
6. Как устроены установки для диффузионной сварки в вакууме?

## 5. СВАРКА ТРЕНИЕМ

### 5.1. Общие сведения о сварке трением

Сваркой трением (СТ) называют технологический процесс получения неразъемного соединения, осуществляемый за счет использования теплоты, образующейся на поверхности контакта двух заготовок, прижатых одна к другой и участвующих в относительном движении. После прерывания или полного прекращения относительного движения СТ завершается приложением усилия проковки.

Как и при других способах сварки давлением, сварное соединение при СТ образуется в результате совместного пластического деформирования приконтактных объемов свариваемых заготовок. Отличительной чертой СТ является получение теплоты непосредственно в зоне контакта за счет прямого преобразования работы, затрачиваемой на преодоление сил трения, возникающих при взаимном перемещении трущихся поверхностей заготовок.

СТ имеет следующие преимущества: высокое качество сварного соединения; высокую производительность; возможность сварки металлов в однородных и разнородных сочетаниях; высокий КИМ; возможность установки машин для СТ в автоматические и роторные линии, управляемые ЭВМ.

#### *5.1.1. Основные способы сварки, наплавки и формоизменения трением*

Сварка трением с непрерывным приводом впервые осуществлена в 1956 г. А. И. Чудиковым (рис. 5.1). Одной из заготовок сообщается вращательное движение с угловой скоростью  $\omega$ . Заготовки соприкасаются, и к ним прикладывается осевое усилие нагрева. Стадия нагрева в существующих машинах для СТ регламентируется либо временем нагрева, либо степенью совместной деформации заготовок. Далее следует торможение подвижной заготовки и проковка.

Известны различные модификации способа, исключающие ограничения по конфигурации свариваемого сечения и длине заготовок, например непрерывная СТ с помощью вращающейся вставки.

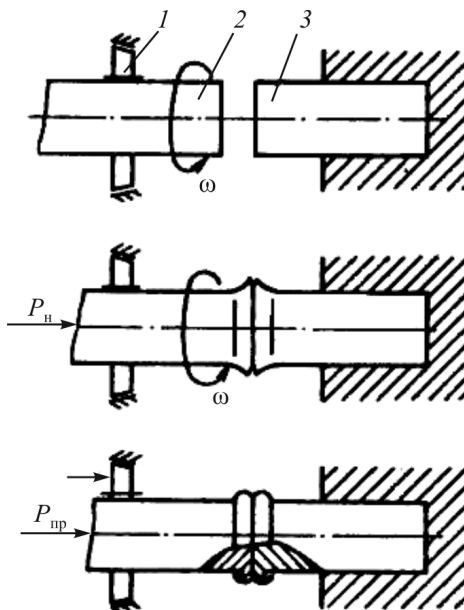


Рис. 5.1. Схема сварки трением с непрерывным приводом: 1 – тормоз; 2, 3 – свариваемые заготовки;  $P_n$  – удельное давление при нагреве;  $P_{пр}$  – удельное давление проковки

Инерционная СТ основана на использовании энергии, накопленной маховиком. Шпиндель с насаженным на него маховиком заданной массы (рис. 5.2) разгоняется. По достижении определенного момента инерции вращающихся масс привод отключают и заготовки сжимают с заданным усилием. Сварка их завершается в момент остановки шпинделя.

Колебательная СТ может выполняться за счет угловых колебаний одной или обеих заготовок или возвратно-поступательного движения (сварка вибротрением). Практическое применение получила только сварка вибротрением для соединения термопластов и реактопластов.

Орбитальная СТ осуществляется движением прижатых одна к другой заготовок по круговой орбите без вращения вокруг собственных осей (рис. 5.3). Оси заготовок смещены во время стадии нагрева на величину эксцентриситета  $e$ , что позволяет получать относительно собственного временного центра круговые движения с орбитальным

радиусом, равным эксцентриситету. По завершении стадии нагрева оси совмещают, прекращая тем самым относительное движение заготовок, и выполняют проковку, формируя сварное соединение.

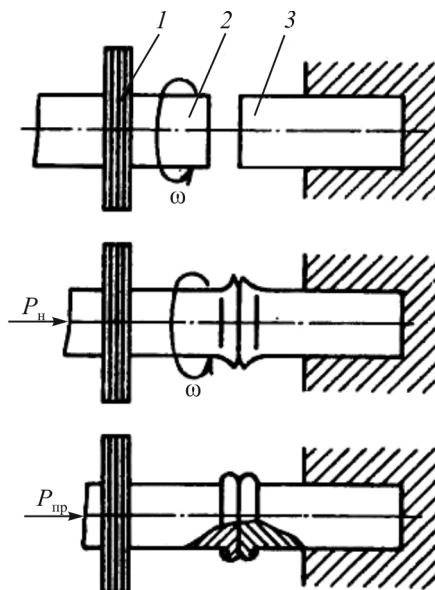


Рис. 5.2. Схема инерционной СТ: 1 – маховик; 2, 3 – свариваемые заготовки

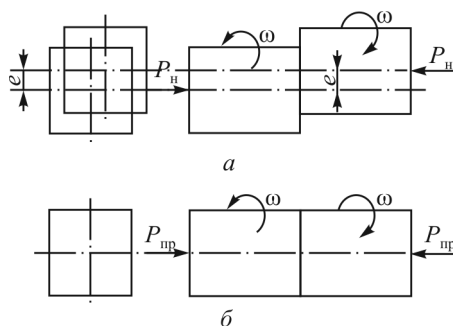


Рис. 5.3. Схема орбитальной СТ: а – стадия нагрева; б – стадия проковки

Орбитальная СТ позволяет сваривать заготовки, имеющие свариваемое сечение произвольной формы, при равномерном тепловыделении на всей свариваемой поверхности. Это делает ее перспективной



для сварки заготовок с большой площадью поперечного сечения. Сложность машин и низкая надежность зажимных устройств вследствие действия на них значительных инерционных сил препятствуют широкому внедрению этого способа в практику.

Радиальная СТ основана на использовании теплоты трения наружного или внутреннего кольца, вращающегося с заданной угловой скоростью, о скошенные концы труб, прижатых одна к другой с определенным усилием (рис. 5.4). По окончании стадии нагрева вращение кольца прекращают и его дополнительно сжимают (раздают) в радиальном направлении.

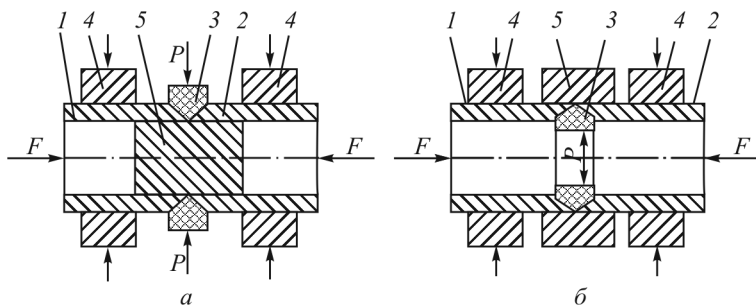


Рис. 5.4. Схема радиальной СТ: а – с наружным разжимным кольцом; б – с внутренним разжимным кольцом; 1, 2 – свариваемые заготовки; 3 – вращающееся кольцо из присадочного материала; 4 – зажимные элементы; 5 – оправка

Роликовая СТ применяется для сварки заготовок из тонколистовых материалов. К концам заготовок подводят ролик, вращающийся со скоростью 1600 рад/с (рис. 5.5). Скорость перемещения ролика относительно свариваемых заготовок составляет 0,1...2,0 м/с при удельном давлении на ролик 0,2...0,5 МПа.

Наплавка трением применяется для восстановления изношенных деталей или для придания поверхности заданных служебных свойств. К поверхности, подлежащей наплавке и перемещающейся с линейной скоростью  $v_{\text{заг}}$ , с усилием  $F$  прижимается вращающийся пруток (рис. 5.6). Теплота, выделяемая при трении, создает тепловое поле, асимметричное поверхности контакта. Поле способствует более интенсивному нагреву прутка по сравнению с заготовкой. Происходит направленный перенос металла с прутка на поверхность заготовки.

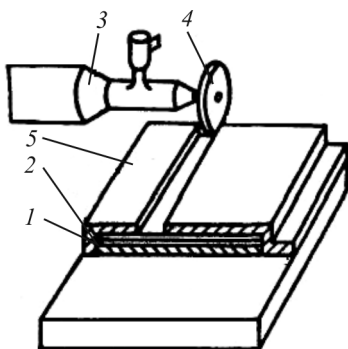


Рис. 5.5. Схема роликовой СТ: 1, 2 – свариваемые заготовки; 3 – шпиндель; 4 – вращающийся ролик; 5 – прижимы

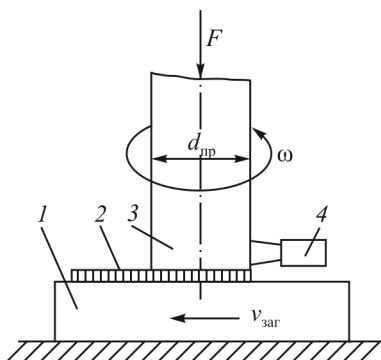


Рис. 5.6. Схема наплавки трением: 1 – наплавленная поверхность; 2 – слой наплавленного металла; 3 – пруток; 4 – резец для снятия грата;  $d_{гр}$  – диаметр прутка

Формоизменение трением – безотходный технологический процесс, широко применяемый в промышленности. Деформирование компактных и трубных заготовок, пластифицированных теплотой трения, осуществляется на машинах для СТ или на металлорежущих станках. Формоизменением трением можно выполнять высадку, вытяжку, формовку, раздачу и разбортовку.

### 5.1.2. Физические основы сварки трением

Для анализа явлений, протекающих при СТ, весь сварочный цикл удобно разделить на отдельные фазы.

Первая фаза (притирка) протекает в условиях сухого или граничного трения (при загрязненных поверхностях). Осевая сжимающая нагрузка вызывает в соприкасающихся микровыступах нормальные напряжения, значительно превышающие пределы текучести, а трение приводит к возникновению касательных напряжений, превышающих напряжения сдвига.

Под действием эквивалентных напряжений на контактных поверхностях будут происходить сложные процессы: разрушение оксидных и адсорбированных пленок; смятие и срез микровыступов при одновременном увеличении в них плотности дислокаций и их упрочнении; вовлечение срезанных микровыступов в граничную плоскость;

образование очагов схватывания и их разрушение. Завершение первой фазы характеризуется прекращением процессов трения вследствие приработки трущихся поверхностей.

Вторая фаза начинается с приложения к заготовкам усилия при нагреве. Более высокое удельное давление интенсифицирует процессы на контактных поверхностях, начатые в первой фазе, и способствует интенсивному тепловыделению в тонких поверхностных слоях. При этом количество выделяющейся энергии в периферийной зоне больше, чем в центральной.

Срезанные и упрочненные микровыступы под действием сил трения и внутреннего давления перемещаются в более пластифицированную зону и движутся по круговой орбите в кольцевой площадке, находящейся на расстоянии  $0,5 \dots 0,7$  радиуса от оси заготовки. Завершение второй фазы характеризуется граничным трением заготовок через срезанные микровыступы по кольцевой площадке.

При движении в кольцевой зоне срезанные микровыступы контактируют между собой и образуют очаги схватывания с основным металлом. Слияние микровыступов носит спонтанный лавинообразный характер, размеры отдельных колоний («клиньев») микровыступов увеличиваются, а их число уменьшается.

При относительном движении деформационно упрочненные «клинья» «пропахивают» более пластичные поверхностные слои и укрупняются, вовлекая в процесс более твердые глубинные слои заготовок. По достижении некоторой критической величины «клиньев» происходит разъединение контактирующих поверхностей (эквапланирование).

Третья фаза характеризуется отрицательной осадкой и ростом сил трения. В этой фазе поверхности заготовок контактируют только через «клинья», что хорошо подтверждается наличием на них следов предыдущей механической обработки и «пропаханной» кольцевой площадки.

Четвертая фаза начинается при достижении температуры в кольцевой зоне  $(0,6 \dots 0,7) T_{\max}$ , предел текучести металла в приконтактных объемах свариваемых заготовок при этом заметно снижается и поверхности соприкасаются. Окончание четвертой фазы характеризуется разрушением «клиньев». Завершение стадии нагрева в четвертой фазе нецелесообразно, так как «клинья», оставшиеся в зоне соединения, будут являться концентраторами напряжений и способствовать низкой циклической прочности.

Пятая фаза характеризуется завершением стадии нагрева. Скорость осадки в этой фазе постоянная.

Шестая фаза – торможение. В результате уменьшения угловой скорости сопротивление сдвигу возрастает. Температура в зоне контакта в этой фазе несколько повышается, а после ее окончания резко снижается.

Седьмая фаза (проковка) начинается после полной остановки шпинделя. Во время этой фазы формируется сварное соединение. Давление проковки не должно быть чрезмерным, так как интенсивное пластическое течение металла может разрушить образовавшееся сварное соединение.

### ***5.1.3. Технологические возможности сварки трением***

Локализация выделения теплоты и пластической деформации в зоне соединения при СТ обуславливает низкий расход энергии на процесс образования сварного соединения и позволяет сваривать разнородные металлы, например алюминий и медь, алюминий и сталь, медь и металлокерамику и др.

Однако способ СТ с непрерывным приводом имеет следующие ограничения: форма одной из заготовок должна приближаться к круговой; масса и длина подвижной заготовки ограничена возможностями конкретной машины; существующие машины для СТ не позволяют соединять заготовки с площадью свариваемого сечения более 150 мм.

Экономическая эффективность от внедрения СТ складывается из нескольких показателей: высокой производительности; экономии материалов; снижения трудоемкости; высокой размерной точности сварных изделий; ограниченного числа послесварочных технологических операций; возможности соединения материалов в разных сочетаниях; небольших и быстро окупаемых расходов на капитальные вложения; низкой энергоемкости и практического отсутствия брака.

## **5.2. Технология сварки трением**

### ***5.2.1. Свариваемые материалы и требования к конструкции***

При проектировании заготовок для СТ необходимо учитывать такие моменты, как возможности имеющейся машины для СТ, свариваемость материалов заготовок; закрепление заготовок в сварочной

машине; стоимость подготовки заготовок к сварке и последующей после сварочной обработки изделия; автоматическое достижение требуемой соосности и угловой ориентации заготовок; создание в ответственных случаях равных условий пластической деформации и симметричного температурного поля.

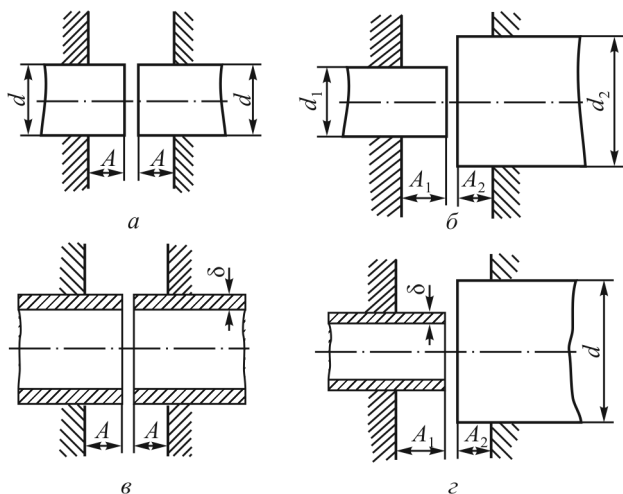


Рис. 5.7. Определение длины вылета заготовки из зажимных устройств:

$$a - A = (0,3 \dots 1,5)d; \quad б - A_1 = (0,3 \dots 1,5)d_1, A_2 = (0,3 \dots 1,5)d_2;$$

$$в - A = (2 \dots 4)\delta; \quad г - A_1 = (2 \dots 4)\delta, A_2 = (0,3 \dots 1,5)d$$

Для обеспечения соосности заготовок неперенным условием является их надежное закрепление. Другим не менее важным условием является необходимая жесткость заготовок на участках от места закрепления до стыка. Рекомендации по выбору длины вылета заготовки из зажимных устройств представлены на рис. 5.7. Длина вылета менее рекомендованной приводит к отпуску зажимных устройств.

### 5.2.2. Подготовка к сварке

Состояние контактных поверхностей свариваемых заготовок при СТ влияет на качество сварных соединений в значительно меньшей степени, чем при других способах сварки давлением. Поверхности могут быть получены резкой ножницами, дисковой пилой и даже газопламенной резкой. Влияние неровностей можно уменьшить притир-

кой или дополнительным временем нагрева. Непараллельность контактных поверхностей может достигать  $5...7^\circ$  без заметного влияния на качество. Небольшие очаги коррозии, грязь, масло, краска и другие загрязнения на контактных поверхностях в процессе СТ удаляются на стадии нагрева. Исключения составляют ржавчина, а также окалина, образованная при прокатке, ковке или горячей объемной штамповке.

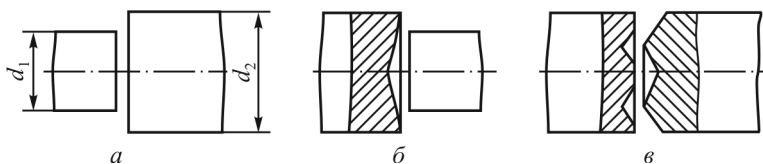


Рис. 5.8. Подготовка контактных поверхностей заготовок из разнородных материалов к сварке: *а* – быстрорежущая сталь – конструкционная сталь; *б* – коррозионностойкая сталь – алюминий; *в* – коррозионностойкая сталь – цинк;  $d_2 = (1,15...1,25) d_1$

При СТ разнородных металлов необходима более тщательная подготовка контактных поверхностей, в частности, при СТ алюминия со сталью торцевое биение стальной заготовки должно быть менее 0,2 мм. На рис. 5.8 представлены примеры подготовки контактных поверхностей к сварке заготовок из разнородных металлов.

### **5.2.3. Выбор параметров режима сварки трением с непрерывным приводом**

Частота вращения является одним из главных регулируемых параметров. При ее увеличении толщина пластифицированного слоя уменьшается, слой становится более однородным, динамические прочностные характеристики соединения повышаются. Частота вращения подсчитывается по оптимальной угловой скорости вращения  $\omega$ , м/с: для черных металлов 2,6...3, для алюминия и меди 2, для титана 4...5.

Удельное давление притирки  $P_n$  назначается для улучшения условий работы машины для СТ. Обычно  $P_n = (0,15...0,20)P_n$ . Для углеродистых сталей  $P_n \approx 10$  МПа. Время притирки  $t_n = 1...3$  с.

Удельное давление при нагреве  $P_n$  при СТ выбирают в пределах, МПа: для углеродистой и низколегированной сталей 30...60, для жаропрочных и инструментальных 60...120, для алюминиевых сплавов

7...23, для сплавов алюминия с медью 40...60, алюминия с коррозионностойкой сталью 6,4...12,2 и титановых сплавов менее 18.

Как показывает практика, при сварке металлов в однородном сочетании  $P_n$  можно изменять в очень широких пределах, получая при этом достаточно высокое качество сварного соединения. При СТ разнородных металлов оптимальное значение  $P_n$  следует выбирать из условия получения скорости деформации, обеспечивающей одинаковую степень деформации обеих заготовок.

Удельное давление проковки  $P_{пр}$  назначают с учетом пластических свойств свариваемых материалов. Обычно  $P_{пр} = (1...3)P_n$ .

Следует отметить, что на прочностные свойства соединения наибольшее влияние оказывает момент приложения давления проковки  $P_{пр}$ , а не его абсолютная величина:  $P_{пр}$  должно быть приложено в тот момент, когда скорость вращения  $\omega$  снизилась и составила 1/3 первоначальной, но не позже, чем через 0,05 с после остановки шпинделя.

Время нагрева оказывает решающее влияние на циклическую прочность и ударную вязкость сварного соединения, особенно при СТ разнородных материалов. Оптимальным следует считать  $t_n$ , равное интервалу от начала сварки (окончания стадии притирки) до начала пятой фазы. Увеличение  $t_n$  приводит к росту зерна и образованию в зоне соединения видманштеттовой структуры.

Время торможения должно быть достаточно коротким, чтобы пластическое течение металла из зоны соединения не успело приобрести устойчивый характер. Интенсивное течение металла и быстрое охлаждение делают невозможным релаксацию напряжений в зоне соединения, что приводит к уменьшению прочности или разрушению соединения сразу же после завершения процесса сварки. Время торможения следует назначать из условия, чтобы ускорение при торможении превышало  $2500 \text{ рад/с}^2$ .

#### **5.2.4. Послесварочные операции**

Целями термической обработки соединений, полученных трением, являются: снижение внутренних напряжений; повышение пластичности; рекристаллизация и улучшение качества соединения в результате протекания диффузионных процессов.

Малоуглеродистые (до 0,26 % С), низколегированные, высоколегированные хромоникелевые аустенитные и хромистые ферритные стали, сваренные в однородном и разнородном сочетаниях, термообработке не подвергают.

Среднеуглеродистые (0,26...0,45 % С) легированные и нелегированные, высоколегированные аустенитно-мартенситные и хромистые ферритно-мартенситные стали, сваренные в однородном и разнородном сочетаниях, подвергаются термообработке. При этом, если углеродный эквивалент  $C_{\text{экр}} > 0,8$  %, термообработку выполняют из нагретого состояния.

Наиболее трудной является термическая обработка сварных соединений разнородных сталей. В этих случаях первоначально назначается смягчающий отжиг, а затем термическая обработка для получения заданных свойств с учетом теплофизических характеристик обоих материалов.

### 5.3. Оборудование для СТ

На рис. 5.9 приведена принципиальная схема машины для сварки трением с непрерывным приводом.

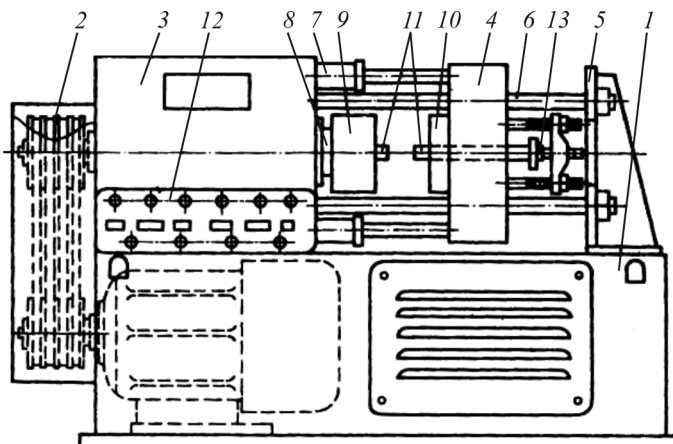


Рис. 5.9. Принципиальная схема машины для СТ с непрерывным приводом: 1 – станина; 2 – привод шпинделя; 3 – передняя бабка; 4 – траверса; 5 – задняя стойка; 6 – направляющая штанга; 7 – гидравлические цилиндры осевого нагружения; 8 – шпиндель; 9 – зажимной патрон вращающейся заготовки; 10 – зажимное устройство неподвижной заготовки; 11 – свариваемые заготовки; 12 – пульт управления; 13 – упор для неподвижной заготовки



В состав оборудования для СТ могут входить: машина для СТ, компьютер с программами параметров режима, станок для снятия графа, роботы или манипуляторы для загрузки-выгрузки и транспортирующие устройства.

#### **5.4. Промышленное применение СТ**

Преимущества СТ по сравнению с другими способами соединения заготовок предопределили ее широкое внедрение в промышленность. Главными причинами возрастающего интереса к СТ являются: возможность соединения металлов и других материалов в разнородном сочетании, что позволяет получать детали с принципиально новыми потребительскими свойствами; значительное снижение затрат на механическую обработку вследствие высокой размерной точности сваренных заготовок; повышенная надежность и низкая стоимость сварного соединения. Преимущества СТ особенно проявляются в массовом и крупносерийном производстве при изготовлении деталей из заготовок, полученных литьем, ковкой, штамповкой или прокаткой.

Несмотря на свою сравнительную «молодость», СТ уже довольно широко применяется в машиностроении, ядерной энергетике, в инструментальном производстве, в электротехнической промышленности, тракторо- и автомобилестроении, а также в самолетостроении, космической технике, химическом и нефтяном машиностроении.

Следует отметить, что возможности СТ далеко еще не исчерпаны. Мировая практика использования СТ в промышленности показывает, что этот вид сварки является одним из наиболее интенсивно развивающихся технологических процессов.

#### **5.5. Контроль качества сварного соединения при СТ**

Качество соединения зависит в основном от таких факторов, как соответствие параметров режима СТ оптимальным; подготовка контактных поверхностей; соответствие материалов заготовок и их термической обработки заданным.

Контроль параметров режима в процессе СТ разделяется на пассивный и активный. При пассивном контроле только регистрируются параметры режима СТ. При активном контроле наряду с регистрацией

выполняется их корректировка по времени путем сравнения их с запрограммированными величинами. При значительном отклонении параметров режима от заданных и невозможности их корректировки система останавливает машину и указывает причину на цифровом табло или дисплее.

Примером системы активного контроля является информационно-измерительный комплекс Controller-III фирмы Kuka (Германия). При отклонении угловой скорости, удельного давления или времени от заданных значений процесс СТ прекращается.

Разрушающие методы контроля применяются при разработке технологического процесса и как выборочные для контроля ответственных деталей I категории.

Для оценки механических свойств соединений, полученных трением, применяются следующие виды испытаний: на растяжение, кручение, изгиб, загиб, ударный изгиб и усталостную прочность, измерение твердости, макро- и микроструктурный анализ. Все перечисленные методы позволяют комплексно оценить структуру и свойства соединений, однако наиболее достоверными, как было отмечено выше, следует считать испытания на ударный изгиб и циклическую прочность.

Неразрушающие методы контроля, используемые на практике, такие как магнитная и ультразвуковая дефектоскопия, гамма- и рентгеноскопия, недостаточно надежны при выявлении дефектов, характерных для соединений, полученных трением.

Представляет интерес контроль соединений вихревыми токами и акустический метод контроля по величине энергии диссипации. Указанные методы бесконтактны, имеют достаточное быстродействие и могут встраиваться в машины для СТ для 100%-ного контроля всех сваренных деталей после удаления грата.

### ***Контрольные вопросы***

1. Каким образом формируется сварное соединение при сварке трением?
2. Каковы физические основы сварки трением?
3. Как выбираются параметры режима при сварке трением?
4. Каковы технологические возможности сварки трением?
5. Что входит в состав машины для сварки трением?

## 6. СВАРКА ВЗРЫВОМ

### 6.1. Общие сведения о сварке взрывом

Сварка взрывом (СВ) является новым революционным технологическим процессом и получает в последние годы все более широкое распространение в отечественной и зарубежной практике благодаря ряду существенных преимуществ в сравнении с традиционными методами.

По теории процесса выполнены многочисленные исследования, в которых теоретически и экспериментально установлены основные закономерности, изучено влияние параметров на образование соединения.

В то же время практическое применение сварки взрывом в промышленности характеризуется низкой технологической оснащенностью процесса, а также недостаточными объемами внедрения. Продолжает оставаться актуальной проблема локализации побочного действия взрыва.

Дальнейшее расширение практического применения сварки взрывом связывается с созданием технологий с высокой степенью автоматизации и механизации всех подготовительных операций и проведением процесса во взрывных камерах.

#### *6.1.1. Определения и основные схемы сварки взрывом*

Сварка взрывом – один из видов сварки давлением, осуществляемый под действием энергии, выделяющейся при взрыве заряда взрывчатого вещества (ВВ).

Принципиальная схема осуществления сварки взрывом изображена на рис. 6.1, а. Неподвижную пластину 4 и метаемую пластину 3 располагают под углом  $\alpha$  на заданном расстоянии  $h$  от вершины угла. На метаемую пластину укладывают заряд 2 ВВ. В вершине угла устанавливают детонатор 1. Сварка производится на опоре 5 (металл, песок и т. д.). Площадь метаемой пластины, как правило, больше площади основной пластины. Нависание метаемой пластины над основной необходимо для уменьшения влияния эффекта бокового разлета продуктов взрыва при детонации плоского заряда ВВ.

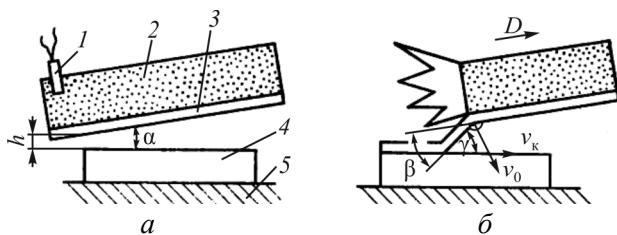


Рис. 6.1. Схема сварки взрывом под углом: *a* – до взрыва; *б* – после взрыва

На практике чаще всего применяется более простая, так называемая параллельная схема, когда угол  $\alpha = 0$ .

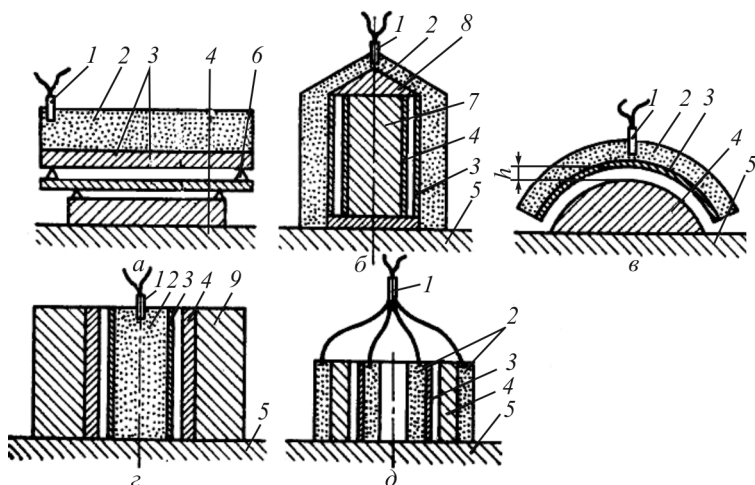


Рис. 6.2. Технологические схемы сварки взрывом: *a* – параллельная для плоских изделий (многослойная); *б* – плакирование наружной поверхности труб; *в* – эквидистантная; *г* – плакирование внутренней поверхности труб; *д* – плакирование крупногабаритных обечаек с противозарядом; 1 – детонатор; 2 – заряд ВВ; 3 – метаемый элемент; 4 – неподвижный элемент; 5 – опора; 6 – установочный элемент; 7 – стержень; 8 – конус; 9 – матрица

Эти базовые схемы положены в основу многочисленных технологических схем, разработанных для СВ конкретных изделий (рис. 6.2).

### 6.1.2. Физические основы сварки взрывом

При инициировании взрыва по заряду ВВ распространяется детонационная волна, скорость фронта которой  $D$  измеряется тысячами метров в секунду (рис. 6.1, *б*). Под действием высокого давле-

ния расширяющихся продуктов взрыва метаемая пластина приобретает скорость  $v_0$  порядка нескольких сотен метров в секунду и соударяется с неподвижной пластиной под определенным углом  $\gamma = \beta + \alpha$ . В окрестности точки соударения развиваются высокие давления, на порядок превосходящие пределы прочности материалов, которые, согласно гидродинамической теории, текут подобно жидкостям. Течение в зоне соударения определяется углом соударения  $\gamma$  и скоростью точки контакта  $v_k$ , которые связаны с исходными параметрами соударения и позволяют изменять режим сварки. В определенном диапазоне изменения этих двух параметров впереди точки контакта возникает стационарный поток массы соединяемых материалов в виде кумулятивной струи или облака дисперсных частиц. При этом производится самоочищение свариваемых поверхностей, а за точкой контакта создаются условия для их сближения под действием высоких давлений соударения и совместного пластического течения. Длительность процесса составляет  $10^{-6} \dots 10^{-5}$  с, поэтому диффузия на заметную глубину происходить не успевает. В оптимальных режимах соударения расплавы не фиксируются. При избыточной энергии соударения наблюдаются отдельные участки с расплавами.

Физические явления, сопутствующие сварке взрывом, структура и свойства соединений в значительной степени зависят от основных параметров сварки взрывом, которые классифицируют на кинематические (скорость движения точки контакта  $v_k$ , угол соударения  $\gamma$ , скорость метания  $v_0$ ) и физические (давление, длительность и температура в зоне соударения).

Для создания в зоне соударения свариваемых пластин необходимых условий соединения их в твердой фазе (образование физического контакта и активных центров) необходимо, чтобы скорость точки контакта  $v_k$  была меньше скорости распространения объемных волн сжатия  $c$ ; в противном случае металл не успевает деформироваться и сварка не произойдет. Это условие осуществляется применением ВВ с соответствующей скоростью детонации.

Энергия, необходимая для сварки двух поверхностей металла и затраченная на пластическую деформацию прилегающих к ним слоев, определяется из энергетического баланса:

$$W_2 = \frac{m_1 m_2}{2(m_1 + m_2)} v_0^2 \left[ 1 - \left( \frac{v_k}{c} \right)^2 \right],$$

где  $m_1$  и  $m_2$  – соответственно массы метаемой и неподвижной пластин.

Скорость движения точки контакта  $v_k$  определяет скорость распространения зоны высокого давления по свариваемым поверхностям. При угловой схеме сварки

$$v_k = D \sin(\gamma - \alpha) / \sin \gamma,$$

$$\gamma = \alpha + \beta = \alpha + 2 \arcsin v_0 / 2D.$$

При начальном параллельном расположении пластин

$$v_k = D,$$

$$\gamma = 2 \arcsin v_0 / 2D.$$

Максимальную скорость метания пластины оценивают по формуле

$$v_0 = 1,2D\sqrt{1 + 32/27r} - 1/\sqrt{1 + 32/27r} + 1,$$

где  $r$  – отношение массы заряда ВВ к массе пластины,  $r = \rho_{ВВ} H_{ВВ} / \rho_{пл} \delta_{пл}$ ;  $\rho_{ВВ}$ ,  $H_{ВВ}$  и  $\rho_{пл}$ ,  $\delta_{пл}$  – плотность и толщина заряда ВВ и метаемой пластины соответственно.

Коэффициент 1,2 применяют при работе со смесевыми ВВ, что обеспечивает расхождение экспериментальных и расчетных значений скоростей порядка 20 %.

Теоретическое и экспериментальное определение давления при косом соударении пластин является весьма сложной задачей. Для оценки проще всего использовать случай нормального соударения, при котором в момент удара пластины соприкасаются по всей площади одновременно и от контактной поверхности распространяются плоские ударные волны.

Иногда в зоне соединения наблюдаются включения литого металла, что свидетельствует о том, что в процессе сварки взрывом металл в этой зоне нагревается до высоких температур.

### ***6.1.3. Технологические возможности сварки взрывом***

Существенным преимуществом сварки взрывом является возможность соединения между собой металлов и сплавов, сварка которых другими способами затруднена. Это относится, в частности, к металлам и сплавам, образующим твердые и хрупкие интерметаллиды, например стали с алюминием или титаном. При этом прочность соединения в большинстве случаев не ниже прочности более слабого металла в паре.

Сварка взрывом используется при получении как биметаллических заготовок, так и готовых деталей. При этом форма и размеры плакируемых изделий практически не имеют ограничений. Так, имеются сведения о плакировании листов площадью до 50 м<sup>2</sup>, толщиной до 460 мм и массой до 40 т. Толщины плакирующих слоев могут быть от 0,01 до 45 мм.

Весьма эффективным является использование сварки взрывом при плакировании труб или цилиндров, а также деталей с криволинейной поверхностью (лопасти гидротурбин, подпятники и др.). При необходимости с помощью сварки взрывом можно осуществлять частичное плакирование.

## **6.2. Технология сварки взрывом**

### ***6.2.1. Свариваемые материалы и требования к ним***

Сваркой взрывом можно соединять практически любые разнородные металлы и сплавы. Число получаемых композиций достигает нескольких сотен.

Определенные трудности возникают при сварке взрывом материалов с пониженными пластическими свойствами (молибден, вольфрам, закаленные и высокопрочные стали, чугун и др.), что обусловлено интенсивной деформацией при двойном перегибе метаемой пластины (см. рис. 6.1) и высоким уровнем остаточных напряжений, сопутствующих процессу. Считается, что материалы с пластичностью менее 5 % невозможно сваривать качественно без применения дополнительных технологических приемов, например предварительного подогрева. Основным дефектом при сварке малопластичных материалов являются трещины.

Материалы с низкой температурой плавления (свинец, олово, алюминий), обладающие к тому же высокой пластичностью, требуют минимального введения энергии при сварке взрывом и дополнительных мер по защите поверхности от бризантного действия ВВ.

Достаточно сложной технологической задачей является получение сваркой взрывом равнопрочного соединения материалов, образующих хрупкие интерметаллиды. Такие композиции, как сталь-алюминий, сталь-титан и т. п., сваривают в умеренных режимах. В случае сварки толстых листов таких материалов, требующей значительных энергозатрат, применяют промежуточные прослойки из материалов, не образующих интерметаллидов с соединяемыми материалами.

Твердость свариваемых материалов значительно влияет на структуру и прочность соединения. В частности, не удалось получить прочных соединений закаленных сталей с алюминием и титаном без специальных технологических приемов.

### ***6.2.2. Подготовка материалов к сварке***

Перед сваркой взрывом соединяемые материалы должны быть соответствующим образом подготовлены. Загрязнения свариваемых поверхностей масляными пленками, ржавчиной, окалиной и т. п. недопустимы при СВ, так как при скоростях детонации 2000...2500 м/с с контактной поверхности удаляется только тонкий слой толщиной до 15 мкм.

Опыт, полученный при СВ, показал, что свариваемые поверхности должны быть зачищены до металлического блеска или протравлены и обезжирены.

Исходные материалы не должны иметь внутренних дефектов (включений, пор, трещин), в противном случае возможно разрушение. Практика СВ показала, что прогиб исходных листовых заготовок не должен превышать 5...10 мм на погонный метр. Несоблюдение этого требования приводит к недопустимому колебанию сварочного зазора и, как следствие, к нестабильности свойств биметаллических заготовок по площади вплоть до отсутствия прочности или появления непроваров.



### 6.2.3. Выбор параметров режима сварки взрывом

Из-за специфических особенностей процесса универсального режима СВ пока не найдено. В связи с этим при выборе параметров сварки взрывом в настоящее время в основном применяют экспериментальные методы.

Для приближенного определения нижней границы области сварки можно использовать выражение для минимального угла соударения:

$$\gamma_{\min} = 1,14\sqrt{HV / (\rho v_k^2)},$$

где  $HV$  – твердость по Виккерсу. Учитывая, что при малых углах соударения  $\gamma \approx v_0/v_k$ , минимальную скорость метания можно определить из выражения

$$v_{\min} = 1,14\sqrt{HV / \rho}.$$

Скорость точки контакта определяет время протекания деформационных процессов в зоне соударения, поэтому для получения качественной сварки необходимо ее выдерживать в определенном интервале. Анализ опытных данных показывает, что лучшие результаты достигаются при  $v_k = 0,44 \dots 0,6$  с.

Скорость точки контакта можно регулировать изменением скорости детонации путем применения соответствующих ВВ.

Для расчета угла соударения на практике удобнее всего использовать зависимость

$$\gamma \approx v_0 / D = 3r / (4r + 9).$$

Метаемая пластина приобретает максимальную скорость на расстоянии  $h \approx \delta_{\text{пл}}$ , поэтому на практике сварочный зазор выдерживают в пределах  $h = (1 \dots 2)\delta_{\text{пл}}$ .

В ряде случаев при выборе режима СВ базируются на энергетическом подходе к природе процесса. Считается, что минимальная энергия пластической деформации, необходимая для образования равнопрочного соединения,

$$W_2 = 0,606 + 0,184 \ln(HV / \delta),$$

где  $HV$  – твердость по Бринеллю;  $\delta$  – относительное удлинение, %.

### 6.3. Оборудование и оснастка для СВ

Оборудование и оснастка для сварки металлов взрывом зависят от места проведения работ. В настоящее время процесс осуществляется в полевых условиях (на полигонах) и на территории промышленных предприятий.

#### 6.3.1. Оборудование и оснастка при СВ в полевых условиях

Под полигон отводится территория, удаленная от промышленных баз и населенных пунктов. Размеры ограждаемой зоны рассчитываются исходя из массы единовременно подрываемого заряда. Полигоны оборудуются минными станциями и укрытиями для техники.

Изделия обрабатывают на специальных опорах. Они должны иметь достаточную долговечность и обеспечивать минимальную деформацию изделий. Например, при плакировании уникальных изделий – лопастей гидротурбин – применяется опора с наполнителем из металлической дроби (рис. 6.3).

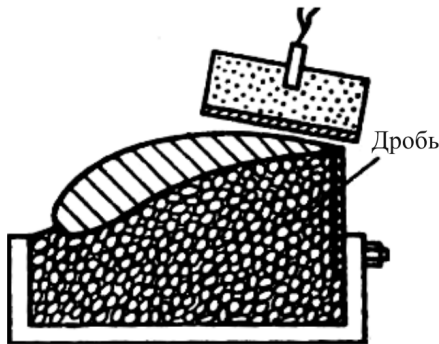


Рис. 6.3. Опора для плакирования лопастей гидротурбин

Подготовку опор из грунтово-песчаных смесей и щебня для очередного взрыва ведут с использованием бульдозера, погрузчика. Размещение изделий на опоре осуществляется при помощи автокранов соответствующей грузоподъемности. Для укладки заряда при больших размерах заготовок (несколько квадратных метров) или криволинейной поверхности плакирующего листа используют различного рода приспособления.

### ***6.3.2. Оборудование и оснастка при СВ в условиях промышленных предприятий***

При ведении СВ в условиях промышленного предприятия в качестве локализаторов поражающих факторов взрыва используют подземные выработки, бетонные и металлические взрывные камеры. Бетонные взрывные камеры применяют при использовании заряда массой до 25 кг ВВ.

Для создания промышленных установок сварки взрывом наиболее перспективны металлические взрывные камеры. Они представляют собой замкнутые оболочечные конструкции цилиндрической или сферической формы, снабженные загрузочным люком, внутренней опорой, системой вентиляции и подрыва заряда. В ряде конструкций взрывных камер применяются внутренние защитные экраны, ослабляющие ударную волну, воздействующую на оболочку.

Для взрывных камер повышенной мощности используют крупногабаритные оболочки, а также комбинированные оболочечные конструкции. Оболочки этих камер имеют толщину 5...20 мм при диаметре 0,5...10 м, но для увеличения их мощности в конструкцию введены защитные экраны. Многолетняя эксплуатация взрывных камер, рассчитанных на заряд от 0,25 до 50 кг ВВ, подтвердила их высокую надежность и удобство в обслуживании.

## **6.4. Промышленное применение СВ**

В отечественном машиностроении накоплен значительный опыт плакирования взрывом и изучены служебные свойства получаемых биметаллических заготовок и деталей.

Непосредственное плакирование взрывом плоских изделий является высокорентабельным процессом, особенно при большой толщине основного слоя. В частности, освоено плакирование листов толщиной 70...100 мм, площадью 10...20 м<sup>2</sup> для сосудов давления ответственного назначения. Биметалл технологичен, не требует изменения принятой на заводе технологии изготовления сосудов высокого давления. Установлено, что непосредственно плакированный взрывом биметалл по комплексу изученных свойств (статической, циклической, повтор-

но-статической, термоциклической прочности, стойкости к коррозии) не уступает биметаллу, полученному наплавкой, а по ряду свойств превосходит его.

В России разработано и внедрено несколько десятков технологий получения биметалла СВ, дающих положительный эффект.

### **6.5. Контроль качества сварного соединения при СВ**

К основным показателям качества биметалла, полученного сваркой взрывом, относятся сплошность и прочность соединения, общая прочность биметалла, деформация изделия.

Сплошность соединения оценивают по данным ультразвукового контроля. Для ответственных изделий возможно применение рентгеновских методов контроля. Прочность сцепления слоев определяют по результатам испытания на срез и отрыв по известным методикам. Испытания на отрыв предпочтительнее из-за волнового характера соединения. Оценку пластичности получают из испытаний на изгиб. Механические и технологические свойства биметалла определяют способами, применяемыми для определения аналогичных свойств монометалла.

Сварка взрывом может вызвать значительные деформации изделий, которые оценивают общеизвестными способами и мерительным инструментом.

#### ***Контрольные вопросы***

1. Какова сущность процесса сварки взрывом?
2. Каковы основные схемы сварки взрывом?
3. Какова физическая сущность сварки взрывом?
4. Каковы технологические возможности сварки взрывом?
5. Каковы области применения сварки взрывом в промышленном производстве?
6. Какое оборудование используется для сварки взрывом?

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Холопов Ю.В. Ультразвуковая сварка металлов и пластмасс. – М.: Машиностроение, 1988.– 224 с.
2. Сварка в машиностроении: справ.: в 4 т. / под ред. И.А. Ольшанского. – М.: Машиностроение, 1987.
3. Шилер З., Гайзиг У., Панцер З. Электронно-лучевая технология: пер. с нем. – М.: Энергия, 1980.– 528 с.
4. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: справ. / Н.Н. Рыкалин [и др.]. – М.: Машиностроение, 1985.– 496 с.
5. Электронно-лучевая сварка / О.К. Назаренко [и др.]; под ред. Б.Е. Патона. – Киев: Наукова думка, 1987. – 256 с.
6. Диффузионная сварка материалов: справ. / под ред. Н.Ф. Казакова. – М.: Машиностроение, 1981.– 271 с.
7. Бачин В.А. Диффузионная сварка стекла и керамики с металлами. – М.: Машиностроение, 1986. – 184 с.
8. Вилль В.И. Сварка металлов трением. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.
9. Каракозов Э.С. Сварка металлов давлением.– М.: Машиностроение, 1986.– 280 с.
10. Дерibas А.А. Физика упрочнения и сварки взрывом. – Новосибирск: Наука, 1980. – 220 с.
11. Седых В.С., Казак Н.Н. Сварка взрывом в металлургии. – М.: Металлургия, 1978. – 168 с.

Учебное издание

Тыткин Юрий Михайлович,  
Трушников Дмитрий Николаевич,  
Беленький Владимир Яковлевич

## **СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ СВАРКИ**

*Учебное пособие*

Редактор и корректор *Е.В. Копытина*

---

Подписано в печать 19.10.12. Формат 60×90/16.  
Усл. печ. л. 5,5. Тираж 100 экз. Заказ № 211/2012.

---

Издательство  
Пермского национального исследовательского  
политехнического университета.  
Адрес: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, к. 113.  
Тел. (342) 219-80-33.