

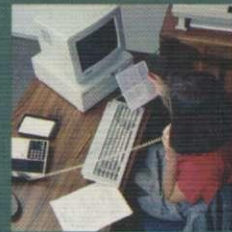
НЕПРЕРЫВНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

СВАРЩИК

1828

В. В. ОВЧИННИКОВ

# СВАРЩИК НА ЛАЗЕРНЫХ И ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ СВАРОЧНЫХ УСТАНОВКАХ



НЕПРЕРЫВНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

# СВАРЩИК

**В. В. ОВЧИННИКОВ**

## **СВАРЩИК НА ЛАЗЕРНЫХ И ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ СВАРОЧНЫХ УСТАНОВКАХ**

Допущено  
Экспертным советом  
по профессиональному образованию  
в качестве учебного пособия  
для использования в учебном процессе  
образовательных учреждений, реализующих  
программы начального профессионального  
образования и профессиональной подготовки

  
ACADEMA

Москва  
Издательский центр «Академия» 1828  
2008

Филиал ГАОУ СПО «ТКВТ»  
Библиотека

УДК 621.791.722(075.9)

ББК 30.61я721

О-355

Серия «Непрерывное профессиональное образование»

Рецензенты:

преподаватель ГУЦ «Профессионал» С.А.Лаврешин;

главный научный сотрудник ФИРО В.Н.Антонов

**Овчинников В.В.**

О-355 Сварщик на лазерных и электронно-лучевых сварочных установках : учеб. пособие / В.В.Овчинников. — М. : Издательский центр «Академия», 2008. — 64 с. — (Сварщик).

ISBN 978-5-7695-3994-7

В учебном пособии предлагается применение компетентностного подхода к подготовке сварщика.

Представлены сведения о процессах, протекающих при лазерной и электронно-лучевой сварке конструкционных материалов, влиянии параметров режима сварки на формирование и размеры швов. Даны рекомендации по выбору режимов сварки. Рассмотрены основные конструктивные элементы установок для электронно-лучевой и лазерной сварки.

Для подготовки, переподготовки и повышения квалификации рабочих по профессиям «Сварщик на лазерных установках» и «Сварщик на электронно-лучевых сварочных установках». Может быть использовано в учреждениях начального профессионального образования.

УДК 621.791.722(075.9)

ББК 30.61я721

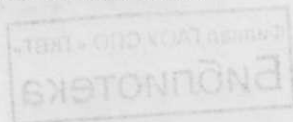
*Оригинал-макет данного издания является собственностью  
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом  
без согласия правообладателя запрещается*

© Овчинников В.В., 2008

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2008

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2008

ISBN 978-5-7695-3994-7





## К читателю

Лазерная и электронно-лучевая сварка являются новыми технологическими способами сварки, имеющими ряд преимуществ по сравнению с традиционными. Работа на лазерных и электронно-лучевых сварочных установках позволяет изготавливать уникальные узлы, сваривать материалы различной толщины и конфигурации. Знания физических основ и технологических особенностей данных способов сварки, а также областей их применения являются необходимыми квалификационными требованиями к подготовке сварщиков на лазерных и электронно-лучевых сварочных установках.

Благодаря учебному пособию вы будете **знать**:

- основы электронно-лучевой и лазерной сварки;
- методы подготовки деталей под электронно-лучевую и лазерную сварку;
- типы сварных соединений для электронно-лучевой и лазерной сварки;
- технологию электронно-лучевой и лазерной сварки сталей и цветных металлов;
- конструкцию установок для электронно-лучевой и лазерной сварки.

Благодаря учебному пособию вы будете **уметь**:

- выполнять электронно-лучевую сварку различных соединений;
- правильно выбирать параметры режима сварки;
- безопасно эксплуатировать оборудование и аппаратуру для электронно-лучевой и лазерной сварки.



# 1

## Физические основы электронно-лучевой сварки

### 1.1

#### Генерирование и формирование электронных пучков

**Электронный луч** — это поток электронов, разогнанных в поле высокого напряжения до больших скоростей и сконцентрированных электромагнитными линзами до необходимой плотности энергии.

Получение электронов, их ускорение в электростатическом поле, фокусировка и отклонение пучка осуществляются устройством, называемым **электронно-лучевой пушкой**.

Свободные электроны можно получить из твердого, жидкого или газообразного вещества. Процесс выхода свободных электронов из вещества называется **эмиссией**. Из холодного металла практически нет эмиссии. Объясняется это тем, что на электрон, стремящийся вылететь из металла, действует сила электрического воздействия (потенциальный барьер). Работа, которую должен совершить электрон, покидая металл, называется **полной работой выхода**.

Для обеспечения эмиссии электронов им необходимо сообщить дополнительную энергию, которая называется **эффективной работой выхода** или **работой выхода**.

Наибольшее применение в технике находят следующие механизмы эмиссии электронов: вторичная электронная эмиссия, фотоэлектронная эмиссия, автоэлектронная эмиссия, термоэлектронная эмиссия.

Вторичная электронная эмиссия наблюдается при бомбардировке поверхности металла в вакууме электронами. При достаточно большой энергии первичных электронов число выходящих в одну секунду с бомбардируемой поверхности вторичных электронов становится больше числа приходящих за то же время на поверхность первичных электронов.

Фотоэлектронная эмиссия заключается в том, что электроны приобретают дополнительную энергию, необходимую для преодоления потенциального барьера и выхода из металла, благодаря поглощению энергии квантов при освещении катода от внешнего источника света.

Автоэлектронная эмиссия обусловлена наличием у поверхности тела сильного электрического поля. Наличие внешнего напряжения облегчает выход электронов и способствует увеличению тока эмиссии. В обычных элект-

ронных пушках механизм автоэлектронной эмиссии имеет второстепенное значение при формировании тока луча. Во многих случаях электростатическая эмиссия в целом оказывает вредное влияние на работу электронной пушки. Результатом такого влияния являются высоковольтные пробойи.

Термоэлектронная эмиссия заключается в выходе электронов из нагретых тел. При повышении температуры катода часть электронов приобретет кинетическую энергию, достаточную для того, чтобы преодолеть потенциальный барьер и выйти из металла в окружающее пространство. Чем больше температура нагрева катода и чем меньше работа выхода материала катода, тем больше ток эмиссии можно получить.

## 1.2

### Проведение электронов до обрабатываемой поверхности

Для получения свободных электронов и для их проведения к обрабатываемой поверхности необходимо оградить их от встречи с молекулами газа. Для этого как в электронно-лучевой пушке, так и в рабочей камере должно быть создано пониженное давление воздуха (разрежение, вакуум). Чем больше разрежение, тем меньше молекул газа на пути движения электрона, тем меньше потеря энергии электронного луча. Высокий вакуум позволяет проводить пучки электронов без потерь на значительные расстояния от места их генерации, что обеспечивает определенные преимущества при сварке.

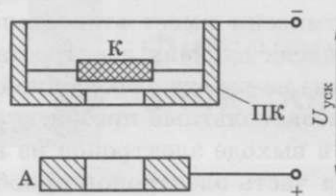
Для того чтобы электрон приобрел большую кинетическую энергию, его необходимо разогнать до больших скоростей. Разгон электронов до скоростей, соизмеримых со скоростью света, осуществляется электрическим полем, которое прикладывается между катодом и анодом.

При встрече с обрабатываемым изделием кинетическая энергия электрона превращается в тепловую энергию и идет на нагрев изделия. Кинетическая энергия одного электрона невелика, так как мала его масса. Но в пучках число электронов, бомбардирующих изделие, очень велико, поэтому наблюдается значительный нагрев изделия в зоне воздействия пучка.

Регулировать мощность электронного пучка можно изменением величины тока пучка  $I_p$ . Рассмотрим принципиально возможные способы регулирования тока электронного пучка.

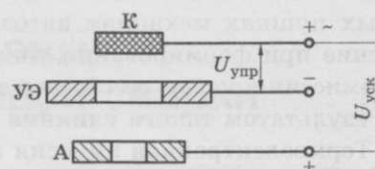
Электронная пушка (рис. 1.1), в которой присутствуют только два электрода — катод (К) и анод (А), представляет собой аналог электронной лампы, называемой *диодом*. С подачей напряжения на электроды пушки в анодной цепи появляется ток пучка, который на начальной стадии растет приблизительно пропорционально увеличению напряжения.

В трехэлектродных пушках (рис. 1.2) между катодом К и анодом А вводится дополнительный электрод — управляющий (УЭ). Между ним и катодом прикладывается так называемое управляющее  $U_{упр}$  напряжение, которое



**Рис. 1.1.** Схема двухэлектродной пушки:

А — анод; К — катод; ПК — прикатодный электрод;  $U_{\text{уск}}$  — ускоряющее напряжение



**Рис. 1.2.** Схема трехэлектродной пушки:

А — анод; К — катод; УЭ — управляющий электрод;  $U_{\text{уск}}$  — ускоряющее напряжение;  $U_{\text{упр}}$  — управляющее напряжение

служит для регулирования тока пучка. Если потенциал управляющего электрода относительно катода отрицателен и достаточно высок, он препятствует проникновению к нему ускоряющего поля анода. При этом ток пучка равен нулю, и говорят, что пушка заперта.

С уменьшением отрицательного потенциала управляющего электрода ускоряющее поле анода проникает сначала к небольшому центральному участку поверхности катода, пушка открывается, появляется ток пучка, который увеличивается по мере расширения этого участка. При некотором значении ускоряющего напряжения  $U_{\text{уск}}$  ускоряющее поле проникает ко всей поверхности катода, управляющий электрод перестает оказывать воздействие на ток пучка, который достигает своего максимума. В этом случае говорят, что пушка полностью открыта.

### 1.3

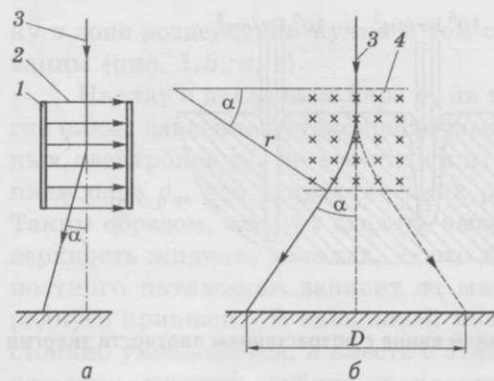
### Концентрация энергии пучка до нужной плотности

Основным способом, регулирующим плотность энергии в электронном пучке, является способ магнитной фокусировки. Работа магнитных фокусирующих систем основана на способности электрона изменять свою траекторию под воздействием магнитных полей. Из физики известно, что вектор силы, действующей на электрон, движущийся в магнитном поле, всегда перпендикулярен вектору его скорости и вектору магнитной индукции поля. Изменяя величину тока фокусирующих систем, можно в широких пределах управлять размерами пятна нагрева на аноде и плотности энергии в нем. Современные электронно-лучевые пушки позволяют получать в пятне нагрева плотность мощности до  $10^8$  Вт/см<sup>2</sup>.

При электронно-лучевой сварке (ЭЛС) перемещать зону нагрева по изделию можно и при неподвижной пушке. С этой целью используются так называемые *отклоняющие системы*.

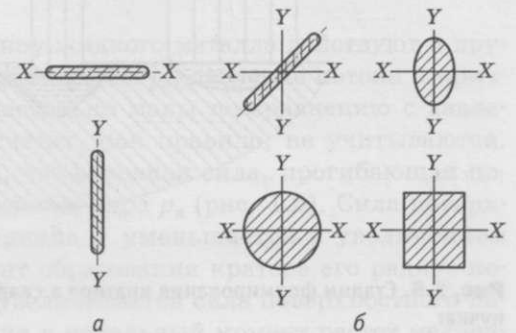
Принцип работы отклоняющих систем основан на способности электронов изменять свою траекторию под воздействием электрических (рис. 1.3, а) и магнитных полей. В электронно-лучевых пушках наиболее часто применя-





**Рис. 1.3.** Отклонение электронного пучка в однородных полях:

*a* — электрическом; *б* — магнитном; 1 — отклоняющие пластины; 2 — электростатическое поле; 3 — электронный пучок; 4 — магнитное поле с индукцией  $H$ ;  $\alpha$  — угол отклонения пучка;  $D$  — амплитуда отклонения пучка;  $r$  — радиус дуги, являющейся траекторией электрона



**Рис. 1.4.** Примеры возможных форм пятна нагрева при колебании электронного пучка:

*a* — по одной из осей; *б* — одновременно по двум осям; X—X, Y—Y — оси

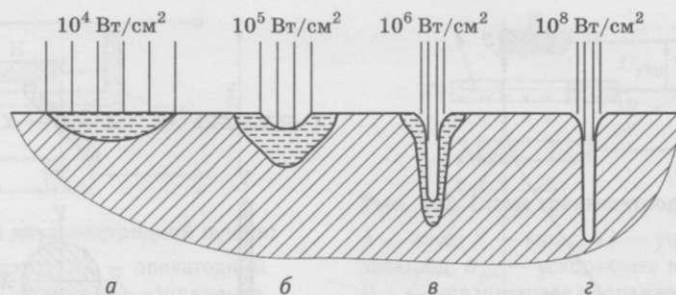
ются магнитные отклоняющие системы с поперечным магнитным полем. Траектория электрона в однородном магнитном поле, перпендикулярном к направлению пучка, является дугой окружности с радиусом  $r$  (рис. 1.3, б).

Угол отклонения пучка  $\alpha$  при постоянном  $U_{\text{уск}}$  обычно составляет  $5 \dots 10^\circ$ . Подавая в катушки отклоняющей системы ток различной величины, можно при неподвижной пушке переместить пучок в любую точку в пределах максимального угла отклонения. При неизменном угле отклонения  $\alpha$  ширина зоны воздействия электронного пучка на изделие будет тем больше, чем больше расстояние от пушки до изделия.

Кроме статического отклонения пучка, ему можно придать при помощи отклоняющей системы различные колебательные движения, в результате чего появляется возможность придавать пятну нагрева на изделии форму, отличную от круглой (рис. 1.4).

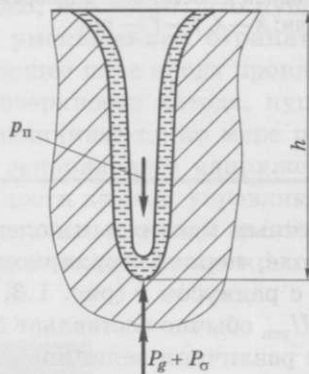
## 1.4 Образование сварочной ванны

При небольших значениях плотности энергии вся теплота выделяется на поверхности металла. При этом формируется сварочная ванна обычной формы в виде полусферы, мало отличающаяся от формы проплавления при дуговой сварке (рис. 1.5, а).



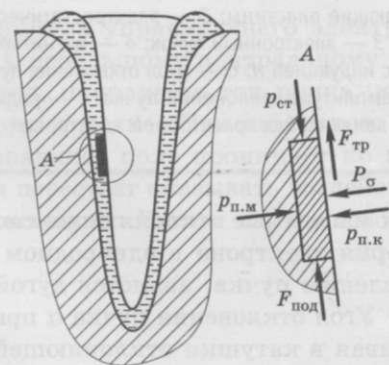
**Рис. 1.5.** Стадии формирования кратера в сварочной ванне с возрастанием плотности энергии пучка:

*a* — сварочная ванна (полусфера); *б* — образование кратера; *в* — углубление кратера; *г* — режим реза



**Рис. 1.6.** Баланс сил на дне кратера в неподвижной сварочной ванне:

$P_g$  — сила тяжести;  $P_\sigma$  — сила поверхностного натяжения;  $p_n$  — давление пара;  $h$  — глубина проплавления



**Рис. 1.7.** Баланс сил на стенке кратера в неподвижной сварочной ванне:

$p_{ст}$  — статическое давление столба жидкого металла, расположенного над элементом;  $p_{н,к}$  — давление пара в капилляре;  $p_{н,м}$  — давление пара в расплавленном металле;  $P_\sigma$  — сила поверхностного натяжения;  $F_{тр}$  — сила трения между потоком пара и поверхностью капилляра;  $F_{под}$  — подъемная сила, связанная с наличием градиента температуры по глубине ванны

При больших плотностях мощности усиливается перегрев поверхности ванны, и процесс испарения металла становится настолько интенсивным, что под давлением пара  $p_n$ , покидающего металл, прогибается поверхность расплава, образуя так называемый кратер, тем самым как бы приближая зону выделения теплоты от торможения электронов к твердому металлу (рис. 1.5, б). Сильное воздействие струи пара уменьшает жидкую прослой-

ку в зоне воздействия пучка и тем самым облегчает плавление металла дна ванны (рис. 1.5, в, з).

Наряду с давлением пара  $p_n$  на ванну жидкого металла действуют и другие силы: давление потока первичных электронов  $p_e$ , давление потока вторичных электронов  $p_0$ , но все эти силы настолько малы по сравнению с давлением пара  $p_n$ , что в практических расчетах, как правило, не учитываются. Таким образом, следует сделать вывод, что основная сила, прогибающая поверхность жидкого металла, — это давление пара  $p_n$  (рис. 1.6). Сила поверхностного натяжения зависит от материала и уменьшается с увеличением радиуса кривизны. В начальный момент образования кратера его радиус постоянно уменьшается, а вместе с этим увеличивается сила поверхностного натяжения, поэтому глубина проплавления в начальный момент растет медленно. При дальнейшем углублении кратера радиус кривизны поверхности расплава на его дне не меняется, следовательно, величина силы поверхностного натяжения перестает увеличиваться, но продолжает возрастать давление пара  $p_n$ , поскольку растет глубина проплавления  $h$ .

По мере заглубления луча уменьшается интенсивность его воздействия на дно кратера и на некоторой глубине наступает динамическое равновесие сил. Диаметр канала кратера примерно в 2—4 раза больше диаметра пучка. Паровой капилляр кратера при этом окружен слоем расплава, который подвержен действию ряда сил (рис. 1.7).

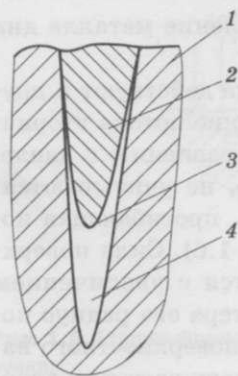
С началом движения луча при сварке паровой канал и слой расплава деформируются и приобретают вид, показанный на рис. 1.8. На передней стенке парового канала (фронте плавления) идет основная отдача энергии электронов. Металл плавится, обтекая луч  $1$  на заднюю стенку канала в зону кристаллизации. Величина жидкой прослойки на передней и боковых стенках кратера невелика и не превышает десятых долей миллиметра. Перетекание металла с передней стенки кратера на заднюю стенку осуществляется в основном под действием двух сил: реакции пара и капиллярной силы. Поскольку в движущейся ванне пучок воздействует в основном на переднюю стенку, там образуется более высокая температура, а следовательно, и реакция пара, которая как бы выжимает жидкий металл в заднюю часть ванны.



**Рис. 1.8.** Форма ванны жидкого металла при движении электронного луча:

1 — электронный луч;  $v_{св}$  — скорость сварки





**Рис. 1.9.** Нижняя часть проплава в сварном шве при ЭЛС:

1 — свариваемый металл; 2 — металл шва; 3 — несплавление металла;  
4 — корневая пустота

На передней стенке в связи с более высокой температурой уменьшается сила поверхностного натяжения, и в результате образовавшейся разницы  $P_{\sigma}$  металл перетекает в заднюю часть кратера.

Геометрия парового канала и окружающего его жидкого материала испытывает быстрые и сильные периодические колебания относительно некоторого среднего состояния. При этом паровой канал на части своей длины или на всей длине может закрываться и образовываться вновь. Периодическая экранировка пучка приобретает особое значение для соединения с несквозным кинжальным проплавлением, так как в этом случае возникает особый дефект шва — неравномерность глубины по его длине (так называемая корневая пила) (рис. 1.9). Продольный разрез образцов с корневой пилой показывает, что пики в своей нижней части не заполнены металлом.

# 2

## Технология электронно-лучевой сварки

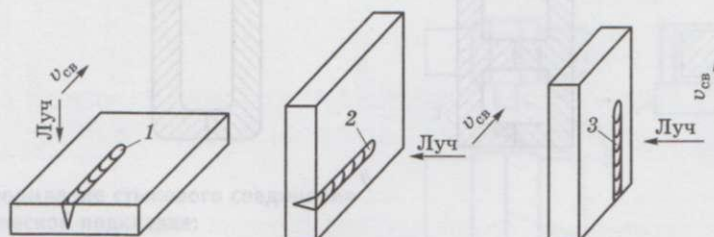
### 2.1

### Основные виды сварных соединений при электронно-лучевой сварке

Наиболее часто при ЭЛС применяются три типа сварных швов, изображенных на рис. 2.1. Шов 1 сваривается вертикально расположенным лучом, швы 2 и 3 — при горизонтальном расположении луча. Промежуточные комбинации этих основных положений на практике встречаются довольно редко.

Основные виды сварных соединений, применяемые при электронно-лучевой сварке, приведены на рис. 2.2—2.4, где стрелками показано направление электронного луча. Наиболее часто при ЭЛС применяют стыковые соединения без разделки кромок и без подачи присадочного материала.

В общем случае при сварке на подкладке и с платиками собранный стык представлен на рис. 2.5. Все составные части свариваемого стыка обрабатываются на механообрабатывающих станках (строгание, фрезерование, точение) с шероховатостью обработанной поверхности  $Ra\ 80\ \dots\ 40\ \mu\text{м}$ . Обработку нужно осуществлять без охлаждающих жидкостей. Зазоры в стыке, а также в местах контакта с технологическими платиками и подкладкой не должны превышать 0,2 мм. Подкладки и платики изготавливают из того же материала, что и свариваемые детали. Термообработку подкладки можно не де-

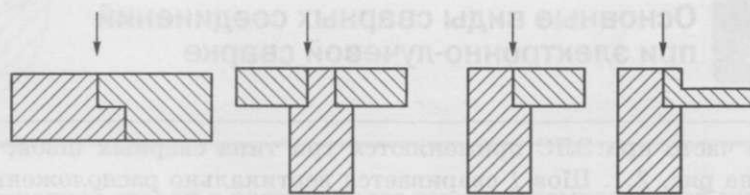


**Рис. 2.1.** Схема пространственного расположения сварных швов при ЭЛС:

1 — горизонтальный шов в нижнем положении; 2 — горизонтальный шов на вертикальной плоскости; 3 — вертикальный шов на вертикальной плоскости;  $v_{св}$  — скорость сварки



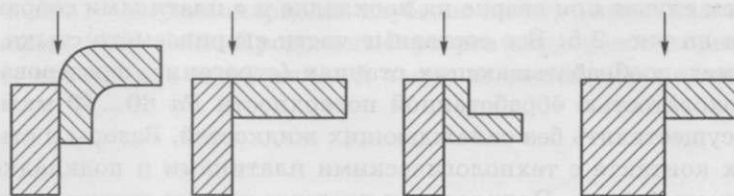
a



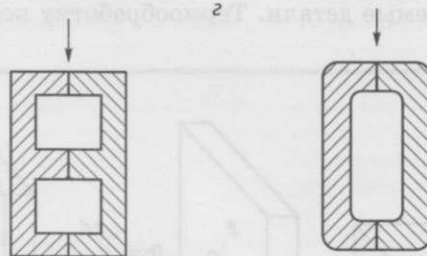
б



в



г

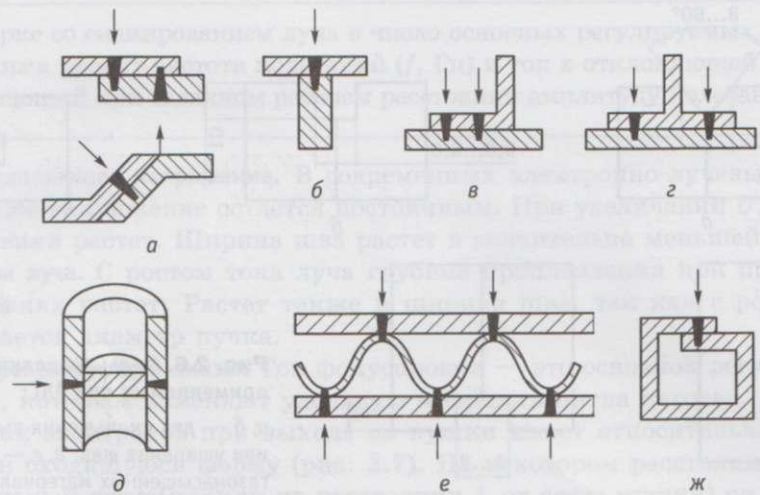


д

**Рис. 2.2. Стыковые соединения:**

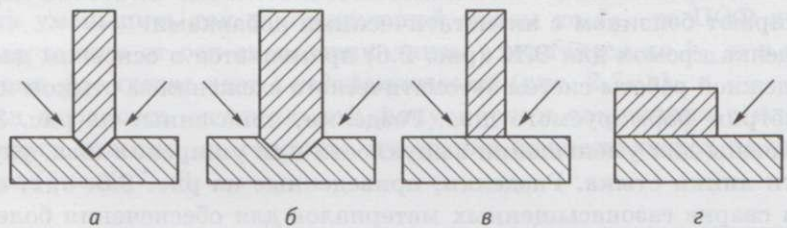
a — со свободным корнем; б — типа «замок»; в — с близкими препятствиями; г — с полусвободным корнем; д — одновременно несколько стыков





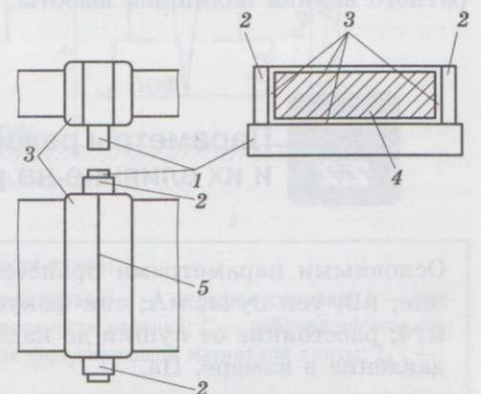
**Рис. 2.3. Сварные соединения типа «нахлестка через стенку»:**

*a* — соединение внахлестку двух листов; *б* — тавровое соединение; *в* — соединение уголка с пластиной; *г* — соединение таврового профиля с пластиной; *д* — вварка заглушки в трубу; *е* — вварка гофра между двумя листами; *ж* — сварка трубы коробчатого сечения



**Рис. 2.4. Сварные соединения «в угол»:**

*a* — тавровое соединение со скосом кромок; *б* — тавровое соединение со скосом кромок и приотуплением; *в* — тавровое соединение без скоса кромок; *г* — нахлесточное соединение



**Рис. 2.5. Оформление стыкового соединения на технологической подкладке:**

1 — технологическая подкладка; 2 — заходной и выходной технологические пластины; 3 — технологические припуски на обработку; 4 — сечение детали; 5 — свариваемый стык



**Рис. 2.6.** Виды разделки кромок, применяемые при ЭЛС:  
*a, б* — для уменьшения выпуклости или уширения шва; *в, г* — при сварке газонасыщенных материалов; *д* — для установки фиксирующего буртика

лять. Стальные заготовки перед сваркой необходимо размагничивать с последующим контролем остаточной намагниченности. Все заготовки перед сборкой протирают бензином с антистатическими добавками.

Разделка кромок для ЭЛС (рис. 2.6) применяется в основном для обеспечения надежной работы систем автоматического слежения за стыком и улучшения геометрии формируемого шва. Разделки, показанные на рис. 2.6, *a, б*, предназначены для уменьшения выпуклости или уширения шва, улучшения видимости линии стыка. Разделки, приведенные на рис. 2.6, *в, г*, применяются при сварке газонасыщенных материалов для обеспечения более интенсивного газоотвода в заданных зонах по высоте стыка. Глубина канавок выбирается из условия их гарантированного заплавления лучом. Разделка в корневой части стыка (рис. 2.6, *д*) используется для установки фиксирующего буртика узкой технологической подкладки и устранения формирования обратного валика излишней высоты.

## 2.2

### Параметры режима электронно-лучевой сварки и их влияние на размеры сварного шва

Основными параметрами процесса ЭЛС являются ускоряющее напряжение, кВ; ток луча, мА; ток фокусирующей линзы, мА; скорость сварки, м/ч; расстояние от пушки до изделия — рабочее расстояние, мм; рабочее давление в камере, Па.

При сварке со сканированием луча в число основных регулируемых параметров режима входят частота колебаний ( $f$ , Гц) и ток в отклоняющей системе, определяющий при заданном рабочем расстоянии амплитуду колебаний луча.

**1. Ускоряющее напряжение.** В современных электронно-лучевых пушках ускоряющее напряжение остается постоянным. При увеличении  $U_{\text{уск}}$  глубина проплавления растет. Ширина шва растет в значительно меньшей степени.

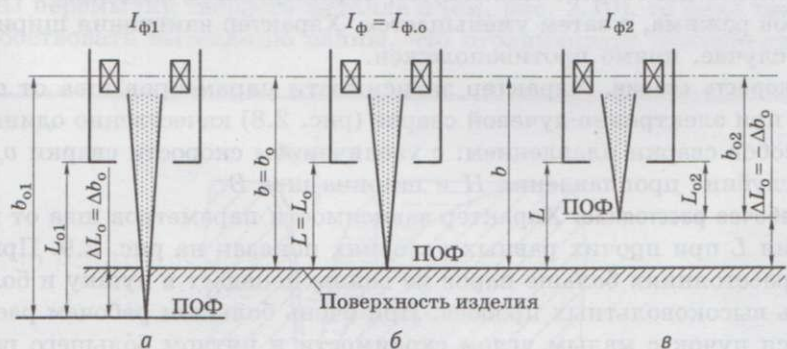
**2. Ток луча.** С ростом тока луча глубина проплавления при прочих равных условиях растет. Растет также и ширина шва, так как с ростом тока увеличивается диаметр пучка.

**Ток фокусирующей линзы.** Ток фокусировки — это основной регулируемый параметр, которым изменяют удельную мощность пятна нагрева.

Пучок электронов при выходе из пушки имеет относительно большой диаметр и сходящуюся форму (рис. 2.7). На некотором расстоянии  $b$  от оси фокусирующей системы (или на расстоянии  $L$  от среза пушки) он имеет минимальный диаметр. Этому положению соответствует некоторая величина тока фокусировки, которую называют током оптимальной (острой) фокусировки  $I_{\text{ф.о}}$  для данного рабочего расстояния  $L_0$  или расстояния от оси линзы  $b_0$ . Плоскость, где пучок имеет минимальное сечение, называют *плоскостью оптимальной (острой) фокусировки (ПОФ)*.

Если уменьшить ток фокусирующей линзы до  $I_{\text{ф1}}$ , то ПОФ луча опустится, расстояние от оси симметрии линзы увеличится до  $b_{01}$  и в этом случае говорят, что *сварка идет с недофокусировкой* (рис. 2.7, а).

Если плоскость оптимальной фокусировки совмещена с плоскостью свариваемого изделия, то говорят, что *сварка осуществляется на острой фокусировке* (рис. 2.7, б).



**Рис. 2.7.** Схемы сварки при различных фокусировках пучка:

а — недофокусировка; б — оптимальная (острая) фокусировка; в — перефокусировка;  $b$  — расстояние от оси магнитной фокусирующей линзы до поверхности изделия;  $L$  — рабочее расстояние; ПОФ — плоскость оптимальной фокусировки;  $I_{\text{ф}}$  — ток фокусирующей магнитной линзы;  $I_{\text{ф.о}}$  — ток оптимальной фокусировки



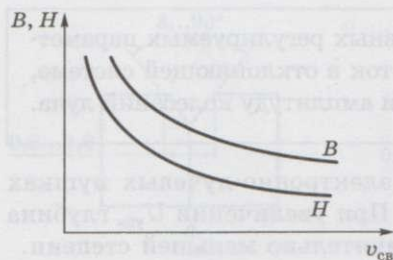


Рис. 2.8. Зависимость глубины проплавления  $H$  и ширины шва  $B$  от скорости сварки  $v_{св}$

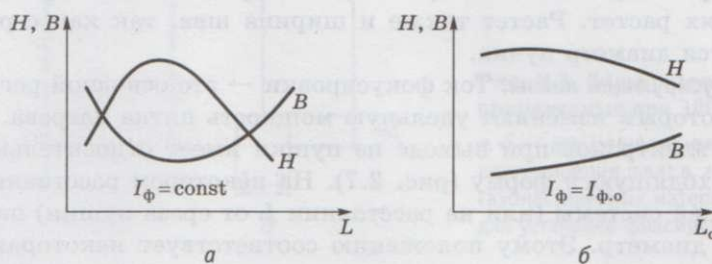


Рис. 2.9. Зависимость глубины проплавления  $H$  и ширины шва  $B$  от рабочего расстояния  $L$ :  
 $a$  — при  $I_{\phi} = \text{const}$ ;  $b$  — при  $I_{\phi} = I_{\phi.o}$

Если увеличить ток фокусирующей линзы до значения  $I_{\phi 2}$ , то фокальная плоскость приблизится к линзе на расстояние  $b_{o2}$ , а к срезу пушки — на расстояние  $L_{o2}$ . Если при этом рабочее расстояние, т.е. расстояние от среза пушки до изделия оставалось прежним, то сварку в этом положении принято называть *сваркой с перефокусировкой* (рис. 2.7, в).

Глубина проплавления с ростом тока фокусировки сначала увеличивается, достигает некоторого максимума, определяемого величиной остальных параметров режима, а затем уменьшается. Характер изменения ширины шва, в общем случае, прямо противоположен.

**3. Скорость сварки.** Характер зависимости параметров шва от скорости процесса при электронно-лучевой сварке (рис. 2.8) качественно одинаков для всех способов сварки плавлением: с увеличением скорости сварки  $v_{св}$  уменьшаются глубина проплавления  $H$  и ширина шва  $B$ .

**4. Рабочее расстояние.** Характер зависимости параметров шва от рабочего расстояния  $L$  при прочих равных условиях показан на рис. 2.9. При малых рабочих расстояниях больше паров из ванны попадает в пушку и больше вероятность высоковольтных пробоев. При очень большом рабочем расстоянии получается пучок с малым углом сходимости и пятном большего размера в плоскости оптимальной (острой) фокусировки. Оптимальное расстояние, обеспечивающее максимальную глубину проплавления шва, находится где-то между крайними значениями.

При отклонении рабочего расстояния от оптимального как в одну, так и в другую сторону, глубина проплавления уменьшается.

**5. Рабочее давление в камере.** Электронно-лучевая сварка может осуществляться в высоком, среднем и низком вакууме. При ЭЛС в высоком вакууме давление в камере поддерживается на уровне  $10^{-5} \dots 10^{-3}$  мм рт. ст. Изменение вакуума в пределах этого диапазона практически не отражается на качестве сварных соединений и на плотности энергии в пятне нагрева.

При ЭЛС в среднем вакууме давление в камере находится на уровне  $10^{-3}$  мм рт. ст. Начиная с  $10^{-2}$  мм рт. ст. наблюдается снижение защитных свойств вакуума. Начиная с 10 мм рт. ст. заметно сказывается и рассеяние энергии электронов на молекулах остаточного газа. При этом уменьшается проплавляющая способность электронного луча.

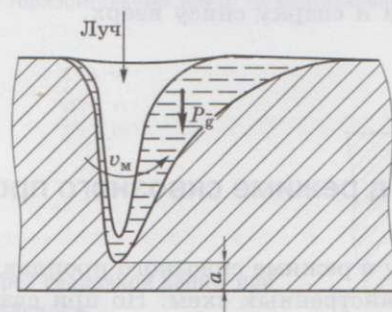
## 2.3

### Сварка в различных пространственных положениях

Возможны пять различных пространственных вариантов сварки: в нижнем положении; в потолочном положении; на вертикальной стенке — снизу вверх, сверху вниз, горизонтальным швом.

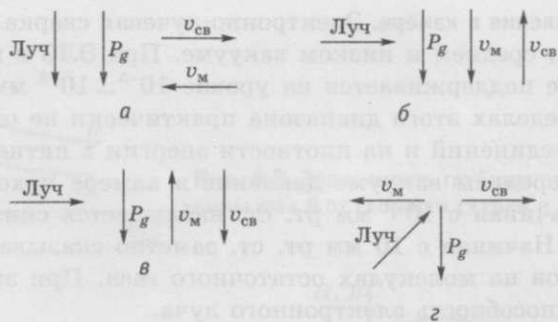
В случае сварки в нижнем положении в жидкой ванне (рис. 2.10) формируется парогазовый канал, находящийся в динамическом равновесии. Жидкий металл, обтекая парогазовый канал, перемещается с передней стенки ванны на заднюю стенку ( $v_m$ ).

Сила тяжести  $P_g$  в основном (рис. 2.11) не препятствует переносу металла с передней стенки на заднюю стенку. Но если убрать из-под корневой части ванны перемычку твердого металла  $a$  (см. рис. 2.10), то сила тяжести будет способствовать вытеканию ванны, что ограничивает применение сварки



**Рис. 2.10.** Разрез ванны при ЭЛС в нижнем положении:

$P_g$  — сила тяжести;  $v_m$  — направление перемещения жидкого металла;  $a$  — перемычка твердого металла



**Рис. 2.11.** Векторы скорости сварки  $v_{св}$ , течения жидкого металла  $v_m$  и силы тяжести  $P_g$  при сварке:

*а* — в нижнем положении; *б* — снизу вверх; *в* — сверху вниз; *г* — горизонтальным швом

со сквозным проплавлением в нижнем положении. Чем тяжелей металл, меньше коэффициент поверхностного натяжения и больше диаметр кратера, тем меньшую толщину можно сварить вертикальным лучом в режиме сквозного проплавления.

При сварке в потолочном положении это ограничение действует и без наличия сквозного проплавления.

При сварке на вертикальной стенке сила тяжести  $P_g$  перпендикулярна к оси электронного пучка, но по-разному ориентирована по отношению к направлению вектора скорости течения металла  $v_m$ :

- при сварке снизу вверх  $P_g$  совпадает с  $v_m$ , т.е.  $P_g$  помогает перетеканию жидкого металла (рис. 2.11, б);
- при сварке сверху вниз  $P_g$  противоположна направлению  $v_m$  и препятствует перетеканию жидкого металла (рис. 2.11, в);
- при сварке горизонтальным швом  $P_g$  перпендикулярна  $v_m$  и практически не влияет на процесс перетекания жидкого металла (рис. 2.11, г).

При сварке горизонтальным лучом наиболее часто применяют сварку горизонтальными швами и сварку снизу вверх.

## 2.4 Сварка в режиме сквозного проплавления

В принципе, сварку в режиме сквозного проплавления можно осуществлять в любой из пространственных схем. Но при сварке в нижнем положении этот процесс ограничен узким диапазоном параметров режима, который зависит от теплофизических свойств металла. Это связано с неблагоприятной ориентацией силы тяжести жидкого металла.

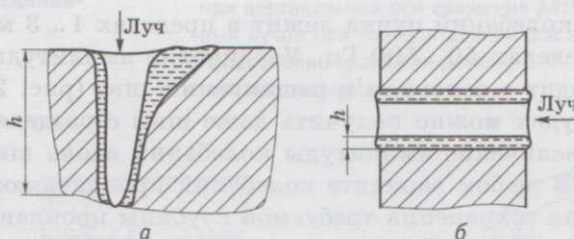


В наибольшей степени преимущества этого способа реализуются при сварке горизонтальным лучом. При этом сила поверхностного натяжения стремится компенсировать значительно меньший столб жидкого металла  $h$  (рис. 2.12). Пары выходят в обе стороны канала, следовательно, повышается стабильность процесса.

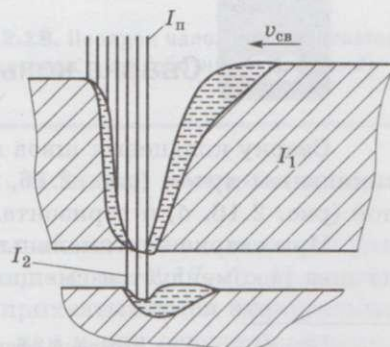
Сварка в режиме сквозного проплавления характеризуется слабой зависимостью параметров шва от вкладываемой мощности по сравнению с режимом несквозного проплавления. Величину тока луча можно увеличить в 2—3 раза по сравнению с тем значением, когда началось сквозное проплавление, а шов будет формироваться достаточно качественно. Это объясняется тем, что в формировании шва участвуют не все электроны пучка  $I_n$ , а только часть из них  $I_1$ . Если эта часть электронов оказывается достаточной для проплавления основной детали, то оставшаяся часть  $I_2$  проходит сквозь деталь (рис. 2.13) и может быть использована для проплавления еще одной детали.

Отрицательным моментом является необходимость гасить мощность луча, прошедшего сквозь деталь, и защищать от его воздействия другие части изделия.

Преимущества сварки со сквозным проплавлением: отпадает необходимость в припусках на механическую обработку, в разделках, накладках;



**Рис. 2.12.** Высота столба жидкого металла  $h$  при различных схемах сварки:  $a$  — нижнее положение;  $b$  — горизонтальным лучом на вертикальной стенке



**Рис. 2.13.** Продольный разрез сварочной ванны при сварке со сквозным проплавлением:

$I_n$  — ток пучка;  $I_1$  — ток пучка, затрачиваемый на проплавление детали;  $I_2$  — ток пучка, прошедший через деталь;  $v_{св}$  — скорость сварки



уменьшается пористость; оптимизируется структура металла шва, улучшаются его механические свойства, уменьшаются сварочные напряжения и деформации; снижаются требования к точности изготовления деталей и сборки узлов, наведения луча на стык, стабильности параметров режима сварки.

## 2.5 Сварка с колебанием пучка

**Осцилляция** — колебание пучка. Колебательные перемещения пучка представляют дополнительную возможность влиять на процесс сварки и на образование шва. Если частота колебания пучка достаточно мала, то паровой канал практически не изменяется в диаметре. При более высокой частоте происходит расширение парового канала. В результате колебания пучка усиливается дегазация металла ванны, что способствует уменьшению пористости шва.

Соответствующим выбором частоты и амплитуды колебаний пучка можно подавить дефекты в виде корневой пилы, пористости, раковин, трещин по центру шва.

Амплитуда колебаний пучка лежит в пределах 1...3 мм, а частота колебаний — в пределах 50...500 Гц. Увеличение амплитуды колебаний поперек шва приводит в основном к расширению шва (рис. 2.14, а—в). При больших амплитудах можно получить даже швы с разделенными ваннами (рис. 2.14, г). Увеличение амплитуды колебаний вдоль шва меняет форму шва (рис. 2.15). В любом варианте колебаний проплавливающая способность луча падает, и для сохранения требуемой глубины проплавления необходимо увеличивать ток луча. Наиболее часто применяются круговые, синусоидальные, прямоугольные и пилообразные колебания.

## 2.6 Сварка кольцевых швов

Сварку кольцевых швов можно осуществлять в нижнем положении вертикальным лучом (рис. 2.16, а) или горизонтальным лучом при вертикальной (рис. 2.16, б) и горизонтальной (рис. 2.16, в) осях вращения изделия.

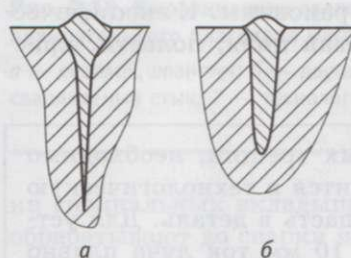
При сварке вертикальным лучом для улучшения формирования металла шва рекомендуется смещать луч относительно «зенита»<sup>1</sup> в сторону, про-

<sup>1</sup> Зенит — точка небесной сферы над головой наблюдателя.

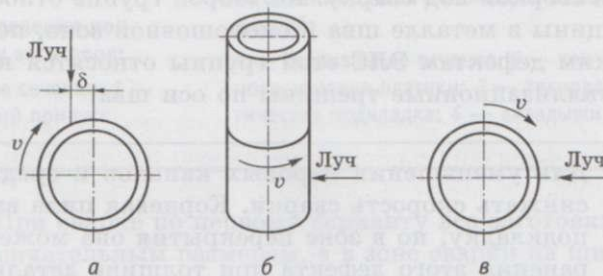


**Рис. 2.14.** Изменение характера проплавления при увеличении амплитуды поперечной осцилляции пучка:

*а—в* — расширение шва; *г* — швы с разделенными ваннами

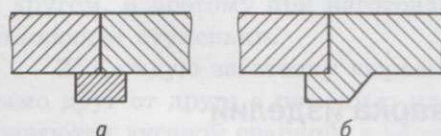


**Рис. 2.15.** Форма проплавления шва без осцилляции пучка (*а*) и при продольной осцилляции (*б*)



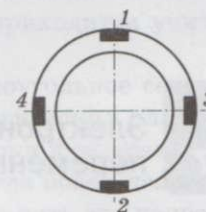
**Рис. 2.16.** Схемы сварки кольцевых стыков:

*а* — в нижнем положении; *б* — горизонтальным лучом при вертикальной оси вращения детали; *в* — горизонтальным лучом при горизонтальной оси вращения детали; *v* — направление вращения детали;  $\delta$  — смещение луча относительно «зенита»



**Рис. 2.17.** Сборка кольцевых стыков под сварку:

*а* — на технологической подкладке; *б* — при замковом соединении



**Рис. 2.18.** Порядок наложения прихваток кольцевого стыка (обозначен цифрами)

типоволожную направлению вращения детали. Величина смещения зависит от диаметра детали и свариваемой толщины.

Сварка кольцевых стыков осуществляется либо на технологической подкладке (рис. 2.17, *а*), либо при сборке «в замок» (рис. 2.17, *б*). Непосредственно перед осуществлением сварки детали прихватываются электронным лучом (рис. 2.18). Ток фокусировки такой же, как и при основном проходе.



Повышать мощность пучка в начале сварки тоже надо плавно во избежание чрезмерного усиления шва, вытекания металла ванны и возможного появления непровара в этом месте при перекрытии.

Самый неблагоприятный момент при сварке кольцевых стыков — процесс замыкания шва. Обычно в этой зоне сосредоточена основная часть дефектов. Все дефекты при сварке тел вращения можно разделить на две группы. К первой группе дефектов относятся дефекты формирования шва: резы, наплывы, прожоги, кратеры, чрезмерное расширение шва. Возникновение указанных дефектов обусловлено нарушением режима сварки, неисправностью оборудования, низкой квалификацией оператора, плохой подготовкой и сборкой под сварку. Ко второй группе относятся горячие и холодные трещины в металле шва и околошовной зоне, поры, раковины. К специфическим дефектам ЭЛС этой группы относятся корневая пила, полости, кристаллизационные трещины по оси шва.

Для уменьшения паровых каналов и срединных трещин, необходимо снижать скорость сварки. Корневая пила выводится в технологическую подкладку, но в зоне перекрытия она может попасть в деталь. Для устранения этого дефекта при толщине детали до 10 мм ток луча плавно снижается, а ток фокусировки остается неизменным. При толщине более 10 мм одновременно с уменьшением тока луча ток фокусировки повышают примерно на 10 %.

Иногда при окончании сварки постепенно поднимают фокус до поверхности детали или применяют осцилляцию пучка по круговой развертке с частотой 100 Гц и амплитудой 1...2 мм.

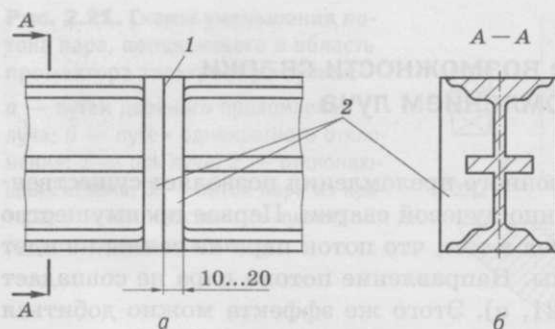
## 2.7

### Электронно-лучевая сварка изделий переменного сечения

В машиностроении нередко возникает необходимость сваривать изделия из нескольких частей по сложному сечению. Наиболее типичной иллюстрацией может служить длиномерный силовой шпангоут (рис. 2.19, а) топливного бака самолета, имеющий сечение в месте сварки в виде двутавра (рис. 2.19, б).

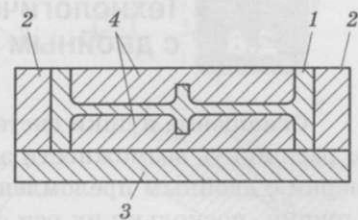
При сварке подобных изделий применяют выравнивание двутаврового сечения до прямоугольного сечения. После выравнивания сечения осуществляют сварку по обычной технологии на технологической подкладке или в режиме сквозного проплавления без технологической подкладки. Выравнивание сложного сечения под прямоугольное сечение можно осуществить двумя путями: с помощью технологического припуска на заготовках; путем установ-





**Рис. 2.19.** Выравнивание сложного сечения до прямоугольного благодаря материалу заготовок:

*a* — силовой шпангоут; *б* — двутавровое сечение; 1 — свариваемый стык; 2 — технологический припуск



**Рис. 2.20.** Выравнивание сложного сечения стыка с помощью вкладышей:

1 — свариваемое сечение; 2 — технологические пластики; 3 — технологическая подкладка; 4 — вкладыши

ки специальных вкладышей. При сварке по первому варианту все заготовки обрабатывают до сварки по окончательным размерам, а в зоне сварки на ширине 10...20 мм от стыка остается прямоугольное сечение.

Этот способ технически возможен, если заготовка имеет некоторый запас материала на технологический припуск, достаточный для полного выравнивания сечения. Если же такой возможности нет, то применяют второй вариант (рис. 2.20). При этом возможны два пути сборки заготовок и вкладышей.

1. Свариваемые заготовки стыкуют друг с другом в приспособлении, а затем к ним подгоняют технологические пластики. Основная трудность состоит в том, что зачастую в месте сварки свариваемые сечения не совпадают друг с другом, и поэтому при изготовлении пластиков приходится учитывать возникающие ступеньки.

2. Каждую заготовку выравнивают под прямоугольное сечение независимо друг от друга с помощью пластиков. Технологические пластики прихватываются дуговой сваркой, а затем плоскость сварки фрезеруют.

Однако на практике встречаются случаи, когда более целесообразно не выравнивать стык под прямоугольное сечение, а варить его непосредственно по переменному сечению. При этом толщина сечения деталей может колебаться в широких пределах, что значительно усложняет технологический процесс их соединения.

Электронно-лучевая сварка деталей переменного сечения может осуществляться со сквозным проплавлением, без сквозного проплавления, а также с комбинацией сквозного и несквозного проплавления. При этом возможны три варианта организации процесса: с программируемым управлением параметрами режима сварки; с автоматическим регулированием тока сварки по току проплавления; с фиксированными параметрами режима сварки.

Оснащение пушки системой двойного преломления позволяет существенно расширить возможности электронно-лучевой сварки. Первое преимущество сварки с двойным преломлением луча в том, что поток пара из ванны не идет в пушку, поскольку их оси смещены. Направление потока пара не совпадает с оптической осью пушки (рис. 2.21, а). Этому же эффекта можно добиться и простым отклонением луча вдоль плоскости стыка (рис. 2.21, б).

При сварке статическим лучом двойного преломления можно сварить шов, не совпадающий с оптической осью пушки, например, если подходу пушки что-то мешает (рис. 2.22, а). Применение колебаний дает возможность осуществить одновременно сварку двух параллельных швов (рис. 2.22, б), или так называемую квазитандемную сварку (рис. 2.22, в).

Все дефекты сварного соединения подразделяются на поверхностные (внешние) и глубинные (внутренние). Поверхностные дефекты выявляются визуальным осмотром, внутренние — с применением физических методов неразрушающего контроля.

Основные виды дефектов, встречающиеся при ЭЛС, приведены на рис. 2.23, а причины их возникновения — в табл. 2.1.

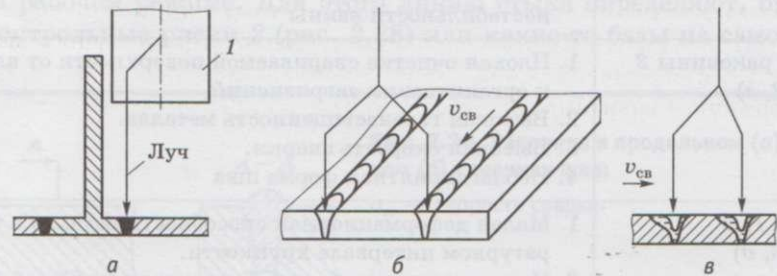
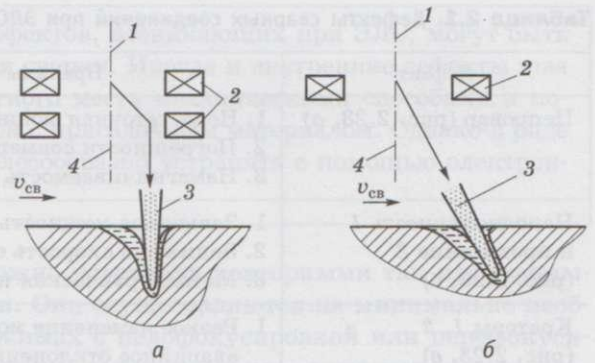
Раковины являются следствием возмущений жидкого металла сварочной ванны. При электронно-лучевой сварке газонасыщенных материалов наблюдаются эпизодические выбросы жидкого металла ванны, что приводит к большой неравномерности внешнего формирования шва и образованию внутренних пустот — раковин. Раковины располагаются в средней и нижней частях шва. В поперечном сечении (рис. 2.24) они имеют прямоугольную форму и занимают все пространство между линиями сплавления. В продольном сечении раковины имеют вытянутую форму и довольно большую протяженность.

Механизм образования раковин можно представить следующим образом (рис. 2.25). Передняя стенка 1 кратера, с которой взаимодействует электронный луч 2, покрыта тонким слоем жидкого металла. Под воздействием истекающих потоков пара эта прослойка испытывает различные возмущения и приобретает волнообразный вид. Чем больше глубина канала, тем больше число выступов и впадин образуется на передней стенке. Угол встречи элект-



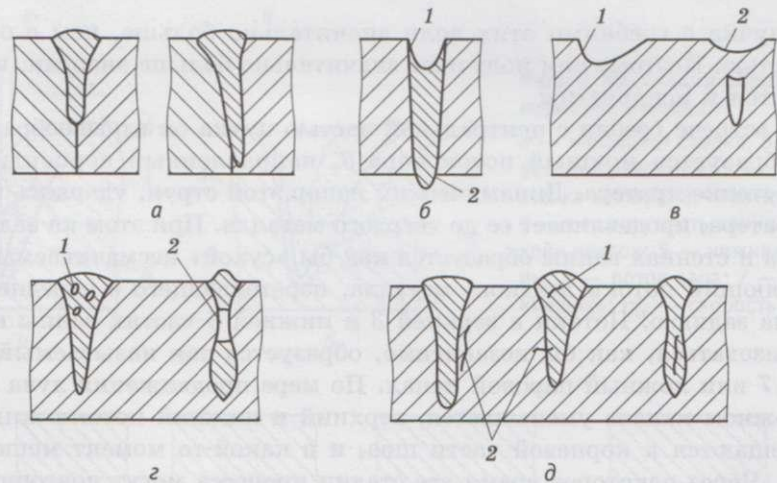
**Рис. 2.21.** Схемы уменьшения потока пара, попадающего в область прожектора электронной пушки:

*a* — путем двойного преломления луча; *б* — путем однократного отклонения; 1 — ось луча; 2 — отклоняющая система; 3 — поток пара из кратера; 4 — оптическая ось пушки;  $v_{св}$  — скорость сварки



**Рис. 2.22.** Примеры сварки с двойным преломлением луча:

*a* — сварка рядом с близкой преградой; 1 — электронно-лучевая пушка; *б* — одновременная сварка двух параллельных швов; *в* — квазитандемная сварка;  $v_{св}$  — скорость сварки



**Рис. 2.23.** Дефекты сварных соединений при ЭЛС:

*a* — непровар; *б* — неполномерность (1) и провисание (2) шва; *в* — кратеры в месте окончания шва (1) и высоковольтного пробоя (2); *г* — поры (1) и раковины (2); *д* — трещины в шве (1) и околошовной зоне (2)



**Таблица 2.1.** Дефекты сварных соединений при ЭЛС

| Дефект  | Причины возникновения дефекта  |
|---|--|
| Непровар (рис. 2.23, а)                         | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Недостаточная мощность луча.</li> <li>2. Погрешности совмещения луча с плоскостью стыка.</li> <li>3. Намагничиваемость детали</li> </ol>   |
| Неполномерность 1 и провисание 2 (рис. 2.23, б) | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Завышена мощность луча.</li> <li>2. Занижена скорость сварки.</li> <li>3. Металлургическая нестабильность ванны</li> </ol>   |
| Кратеры 1, 2 (рис. 2.23, в)                     | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Резкое изменение мощности и плоскости луча (пробой, аварийное отклонение).</li> <li>2. Выброс металла ванны в результате металлургической нестабильности ванны</li> </ol>  |
| Поры 1 и раковины 2 (рис. 2.23, г)              | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Плохая очистка свариваемой поверхности от влаги и органических загрязнений.</li> <li>2. Высокая газонасыщенность металла.</li> <li>3. Высокая скорость сварки.</li> <li>4. Неблагоприятная форма шва</li> </ol>  |
| Трещины 1, 2 (рис. 2.23, д)                     | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Малая деформационная способность металла в температурном интервале хрупкости.</li> <li>2. Неправильно подобранный режим по погонной энергии и току фокусировки.</li> <li>3. Нетехнологичность конструкции узла.</li> <li>4. Большие внутренние напряжения</li> </ol> |

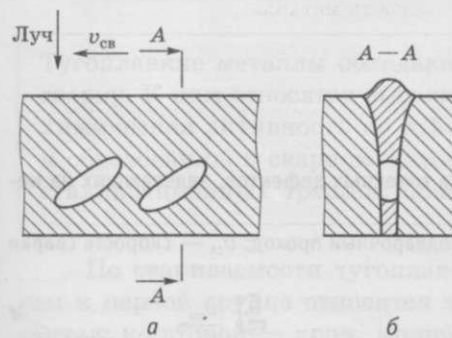
ронного пучка с гребнями этих волн значительно больше, чем с остальной поверхностью. Поэтому они получают значительно больше энергии, интенсивнее плавятся и испаряются.

При встрече гребня с центральной частью пучка он взрывообразно испаряется; образуется мощный поток пара 6, направленный перпендикулярно передней стенке кратера. Динамический напор этой струи, ударяясь в заднюю стенку кратера, продавлиывает ее до твердого металла. При этом на задней стенке кратера и стенках ванны образуется как бы «сухой» несмачиваемый пояс 4, разделяющий потоки жидкого металла, перетекающего с передней стенки кратера на заднюю. Потоки в верхней 3 и нижней 5 частях ванны начинают кристаллизоваться, как бы независимо, образуется так называемый паровой «мешок» 7 или ложный паровой канал. По мере продвижения луча давление пара в ложном канале уменьшается, верхний и нижний потоки жидкого металла смещаются к корневой части шва, и в какой-то момент мешок захлопывается. Через некоторое время все стадии процесса могут повториться.

С увеличением же скорости сварки  $v_{св}$  (рис. 2.26) раковины приобретают все более вытянутую форму. К технологическим мерам борьбы с раковинами, кроме снижения скорости сварки и перехода на сварку в нижнем положении, следует отнести сканирование пучка электронов.

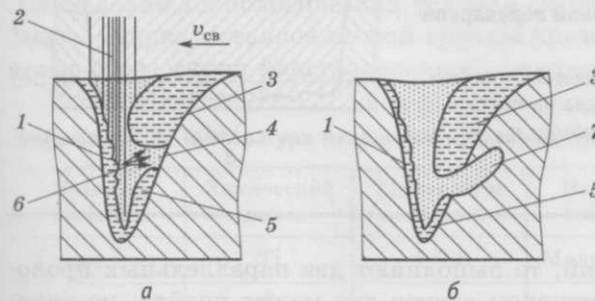
Большинство поверхностных дефектов, возникающих при ЭЛС, могут быть исправлены дугowymi способами сварки. Иногда и внутренние дефекты шва исправляются выборкой дефектного места механическими способами и последующей их дуговой подваркой с присадочным материалом. Однако в ряде случаев возникшие дефекты целесообразно устранять с помощью электронного пучка.

Поверхностные дефекты можно устранять повторными так называемыми «косметическими» проходами. Они осуществляются на минимально необходимую глубину на мягких режимах с недофокусировкой или перефокусировкой (рис. 2.27). Часть внутренних дефектов исправляют повторным проходом на рабочем режиме. Для этого линию стыка определяют, ориентируясь на контрольные риски 2 (рис. 2.28) или какие-то базы на самой детали.



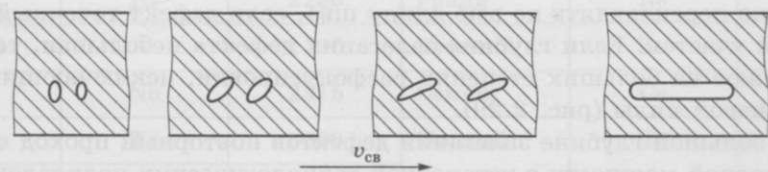
**Рис. 2.24.** Раковина в продольном (а) и поперечном (б) сечениях шва:

$v_{св}$  — скорость сварки

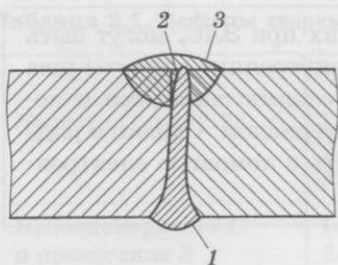


**Рис. 2.25.** Стадии образования парового «мешка»:

а — начальная стадия; б — формирование раковины; 1 — передняя стенка кратера; 2 — электронный луч; 3 — верхняя часть ванны; 4 — «сухой» пояс; 5 — нижняя часть ванны; 6 — поток пара; 7 — паровой «мешок»;  $v_{св}$  — скорость сварки



**Рис. 2.26.** Изменение характера дефекта типа раковины при увеличении скорости сварки

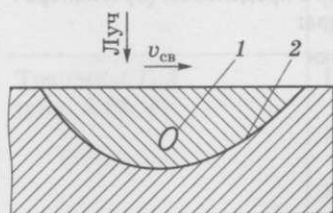
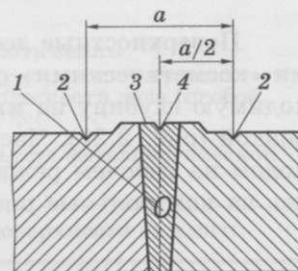


**Рис. 2.27. Заварка поверхностного дефекта:**

1 — основной проход; 2 — непровар; 3 — подварочный проход

**Рис. 2.28. Схема разметки центра шва по контрольным рискам:**

1 — дефект шва; 2 — контрольные риски; 3 — технологический припуск; 4 — риска разметки центра шва;  $a$  — расстояние между крайними рисками

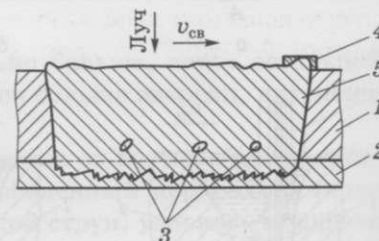


**Рис. 2.29. Заварка точечных дефектов, залегающих на небольшой глубине:**

1 — дефект; 2 — подварочный проход;  $v_{св}$  — скорость сварки

**Рис. 2.30. Устранение дефектов повторной перепаркой шва на всю глубину:**

1 — деталь; 2 — технологическая подкладка; 3 — дефекты, подлежащие исправлению; 4 — накладка на место окончания подварки; 5 — подварочный проход;  $v_{св}$  — скорость сварки



При этом, если дефект 1 широкий, то выполняют два параллельных прохода с расстоянием 1...2 мм. В противном случае луч может пройти, не оплавив ни одну из стенок, и дефект останется незаплавленным.

Можно переплавлять не всю длину шва, если дефект точечный, а лишь небольшой участок. Если глубина залегания дефекта небольшая, то заварку осуществляют на больших степенях расфокусировки, исключая образование корневой пилы (рис. 2.29).

При большой глубине залегания дефектов повторный проход осуществляют на полной мощности с установкой технологических подкладок для выведения корневых дефектов. Ввод осуществляют либо при неподвижном луче,



либо при малой скорости, а потом включают рабочую скорость. Аналогичным образом поступают и при окончании: сначала необходимо остановить движение или снизить скорость сварки, а потом уменьшать мощность пучка. В место окончания подварки можно ввести дополнительный материал в виде накладки 4 (рис. 2.30), а после окончания подварки расплавить его, чтобы заполнить кратер.

## 2.10

### Особенности электронно-лучевой сварки различных металлов и сплавов

**Сварка тугоплавких металлов.** К тугоплавким относятся металлы с температурой плавления выше, чем температура плавления железа (1535 °С). Наиболее тугоплавкими являются вольфрам, рений и осмий (табл. 2.2).

Тугоплавкие металлы обладают рядом общих свойств, затрудняющих их сварку. К ним относятся высокая температура плавления металла; высокая химическая активность по отношению к атмосферным газам; склонность к образованию в сварном соединении крупнозернистой структуры и кристаллизационных трещин; повышенная склонность к порообразованию.

По свариваемости тугоплавкие металлы можно разделить на две группы: к первой группе относятся титан, цирконий, гафний, ванадий, ниобий, тантал; ко второй — хром, молибден, вольфрам. Металлы первой группы при соблюдении технологических условий сварки обладают хорошей свариваемостью. Сварка металлов второй группы представляет значительную трудность из-за образования кристаллизационных трещин. Существует несколько основ-

**Таблица 2.2.** Температура плавления некоторых тугоплавких металлов

| Название элемента | Химический символ | Температура плавления, °С | Название элемента | Химический символ | Температура плавления, °С |
|-------------------|-------------------|---------------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|
| Титан             | Ti                | 1668                      | Молибден          | Mo                | 2622                      |
| Цирконий          | Zr                | 1830                      | Вольфрам          | W                 | 3410                      |
| Гафний            | Hf                | 2230                      | Рений             | Re                | 3170                      |
| Ванадий           | V                 | 1710                      | Рутений           | Ru                | 2450                      |
| Ниобий            | Nb                | 2415                      | Осмий             | Os                | 2700                      |
| Тантал            | Ta                | 3000                      | Иридий            | Ir                | 2350                      |
| Хром              | Cr                | 1890                      |                   |                   |                           |

ных путей получения качественных сварных соединений сплавов на основе тугоплавких металлов. К ним относятся использование исходных металлов с низким содержанием примесей внедрения; организация качественной защиты металла; сварка на режимах, обеспечивающих оптимальные свойства и формирование соединения; регулирование напряженного состояния в сварных соединениях с помощью рационального конструирования сварных узлов.

Наибольшие возможности для практической реализации этих путей обеспечивает электронно-лучевая сварка, поскольку ей присущи высокая плотность энергии в пятне нагрева, идеальная вакуумная защита и широкие возможности управления термическим циклом.

Кромки под сварку могут быть подготовлены различными видами механической обработки. Для уменьшения числа попадающих загрязнений применяют следующие способы обработки свариваемых поверхностей: химическое травление в различных составах на основе кислот и щелочей; электрополирование; обезжиривание ацетоном; прогрев кромок перед сваркой расфокусированным электронным пучком; дегазация металла в процессе вакуумного отжига при давлении не выше  $10^{-3}$  Па; обезвоживание спиртом.

Сварку тугоплавких металлов и сплавов осуществляют при давлении не выше  $10^{-2}$  Па. Сварка при более высоких давлениях приводит к значительному снижению пластических свойств сварных соединений. Для сварки циркониевых сплавов желательно применять системы откачки, обеспечивающие получение высокого и безмасляного вакуума, так как пары масла наряду с растворенными в металле газами увеличивают пористость сварных швов. Вакуум способствует уменьшению содержания растворенных газов и увеличению пластичности металла шва.

Большинство тугоплавких металлов склонно к росту зерна под воздействием термического цикла сварки, поэтому для получения мелкозернистой структуры шва и уменьшения вероятности образования трещин рекомендуется вести сварку возможно более узким пучком на повышенных скоростях. При этом с целью повышения стойкости сварных соединений против образования холодных трещин желателен предварительный подогрев кромок до температуры 260 ... 700 °С.

При сварке сплавов циркония, ниобия, ванадия для снижения уровня остаточных сварочных напряжений и повышения стойкости сварных соединений к замедленному разрушению необходим отжиг после сварки (для циркония 800 °С, для ниобия 1 200 °С, для ванадия 1 100 °С).

**Сварка титановых сплавов.** Титан — один из наиболее распространенных металлов на земле (занимает четвертое место). Удельный вес титана 4,5 г/см<sup>3</sup> и поэтому его относят к легким металлам, а по температуре плавления (1 670 °С) его считают тугоплавким металлом. В зависимости от типа кристаллической решетки титан может находиться в двух модификациях:  $\alpha$  и  $\beta$ .

По прочности титановые сплавы подразделяют на следующие виды: малопрочные с  $\sigma_b < 700$  МПа; среднепрочные с  $\sigma_b = 700 \dots 1000$  МПа; высокопрочные с  $\sigma_b > 1000$  МПа.

По фазовому состоянию все сплавы титана подразделяют на следующие группы: однофазные  $\alpha$ -сплавы (BT1, BT5); псевдо- $\alpha$ -сплавы, содержащие



3... 5 %  $\beta$ -фазы (OT4, BT4, BT20); двухфазные ( $\alpha + \beta$ )-сплавы (BT3, BT6, BT16, BT22, BT23); псевдо- $\beta$ -сплавы с небольшим количеством  $\alpha$ -фазы (BT15);  $\beta$ -сплавы (4201). Наибольшее применение в промышленности имеют сплавы 2-й и 3-й групп. Основные легирующие компоненты: Al, Zr, Mo, V, Cr.

Титан и его сплавы имеют высокую коррозионную стойкость. Некоторые его сплавы по своей стойкости на воздухе и в морской воде не уступают платине, что объясняется образованием на поверхности тонкой окисной пленки, которая отличается большой плотностью. Однако при повышенных температурах титан теряет свою стойкость к газам и начинает интенсивно взаимодействовать с  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $N_2$ . Окисление титана на воздухе начинается с температуры 500 °С. При 850 °С оксиды растворяются в металле, а кислород диффундирует в глубь металла. Азот усиливает окисление титана. Загрязнение титана кислородом способствует образованию альфированного (окисленного) слоя, который отличается очень высокой хрупкостью.

Поглощение титаном водорода начинается с 300 °С и увеличивается по мере роста температуры. Растворимость водорода в титане может достигать 1 % и превосходит растворимость в железе в тысячи раз. Наиболее полно водород и прочие газы удаляются из титана при вакуумной плавке, поэтому, как правило, все сплавы титана подвергаются вакуумному переплаву.

В связи с очень сильной чувствительностью титановых сплавов к газам и негативным их воздействием на свойства титана основная задача при сварке титана — это обеспечение надежной защиты зон, нагретых выше 300 °С от воздействия атмосферного воздуха.

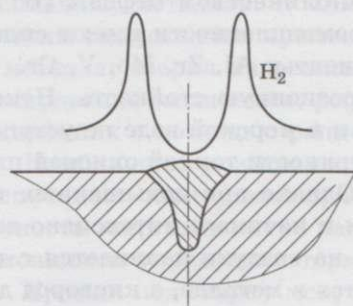
Все титановые сплавы хорошо или удовлетворительно свариваются. Для сварных соединений всех титановых сплавов в той или иной степени характерны две проблемы: замедленное разрушение и пористость шва. Замедленное разрушение объясняют образованием в сварном соединении пиков концентрации водорода (рис. 2.31), которые совпадают с пиками концентрации сварочных напряжений, расположенными вблизи линии сплавления.

Со временем водород превращается в гидриды с увеличением объема, что способствует образованию трещин в околошовной зоне, вызывая замедленное разрушение. Негативное влияние водорода усиливается остаточными сварочными напряжениями.

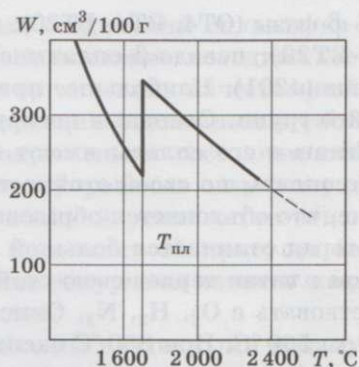
Основными мерами борьбы с замедленным разрушением сварных соединений титановых сплавов являются уменьшение содержания водорода в основном металле и отжиг после сварки. При электронно-лучевой сварке можно, не вынимая изделия из камеры, выполнить локальный отжиг, прогревая зону термического влияния сканирующим пучком.

В отношении пористости при сварке титановых сплавов существуют две основные точки зрения. Согласно первой точке зрения пористость определяется поступлением в сварочную ванну готовых газовых зародышей, возникших вследствие разложения загрязнений и влаги на плотно сжатых поверх-





**Рис. 2.31.** График распределения водорода  $H_2$  в поперечном сечении шва при ЭЛС титана



**Рис. 2.32.** Растворимость водорода  $W$  в жидком титане ( $p_{H_2} = 25$  мм рт. ст.):

$T_{пл}$  — температура плавления титана

ностях стыка. Рекомендуется уменьшать шероховатость кромок путем шлифования и полирования, использовать травление и «тепловую» очистку кромок, а также применять гарантированный зазор в стыке и выполнять газоотводящие каналы на торцевых поверхностях стыка.

Согласно второй точке зрения неперенным условием пористости является пересыщение металла всей сварочной ванны газами, и в первую очередь водородом. При этом поры образуются в результате резкого изменения растворимости водорода  $W$  в металле (рис. 2.32) в момент затвердевания ванны. С этой позиции основными способами борьбы с пористостью можно считать снижение концентрации водорода в сварной ванне и обеспечение оптимальных условий кристаллизации, а в качестве технологических мер уменьшения пористости в швах рекомендуются изменение погонной энергии, применение повторных проходов, использование импульсных режимов и сканирования пучка.

Жидкий титан обладает более высоким поверхностным натяжением, чем сталь и алюминиевые сплавы, что в сочетании с небольшим удельным весом обеспечивает хорошее формирование шва при ЭЛС в нижнем положении на весу, и особенно при сварке горизонтальными и вертикальными швами со сквозным проплавлением. Сварка титана со сквозным проплавлением в нижнем положении может быть выполнена при толщине металла до 80 мм. Чем больше толщина металла, тем выше должна быть скорость сварки. При толщине металла более 80 мм сварку в нижнем положении выполняют только на технологической подкладке, толщина которой обычно составляет 20...30 % толщины свариваемых деталей. Однако на ответственных изделиях сварка в нижнем положении часто выполняется на подкладке при толщине свариваемых деталей 10...70 мм.

Горизонтальное положение сварочной ванны обеспечивает качественное формирование швов с практически параллельными границами на металле толщиной до 150 мм и более и не требует применения подкладки даже при низкой скорости сварки.

Сварку  $\alpha$ - и псевдо- $\alpha$ -сплавов целесообразно проводить на минимальных погонных энергиях. Единственным видом термообработки этих сплавов является низкотемпературный отжиг для уменьшения сварочных напряжений. Механические свойства сварных соединений при ЭЛС выше, чем при аргонодуговой сварке, и близки к показателям основного металла.

**Сварка алюминиевых сплавов.** Алюминий относится к легким металлам. Его удельный вес  $2,7 \text{ г/см}^3$ . Алюминий обладает высокой (в 5 раз выше, чем у железа) теплопроводностью, уступая по этому показателю только меди, и высокой удельной теплоемкостью. Сварные конструкции из алюминия и его сплавов склонны к короблению, что объясняется высоким коэффициентом линейного расширения (в 2 раза выше, чем у стали). Это ужесточает требования к сборке и технологической оснастке.

Сплавы алюминия в зависимости от назначения делятся на литейные и деформируемые. Деформируемые сплавы подразделяются на термически неупрочняемые и термически упрочняемые сплавы.

Все алюминиевые сплавы содержат достаточно большие количества растворенного водорода: сплавы Al—Mg —  $0,6 \dots 0,8 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ , сплав 1201 —  $0,2 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ , сплав 1420 —  $0,4 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ .

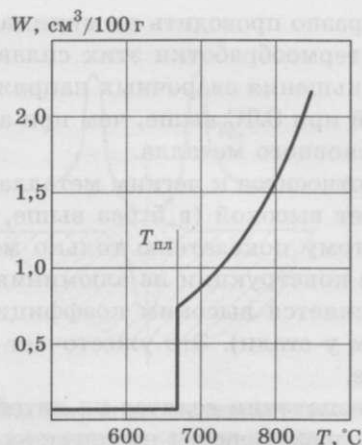
Применение ЭЛС для соединения алюминиевых сплавов обусловлено возможностью однопроходной сварки больших толщин. Особенно заметны преимущества ЭЛС по сравнению с дуговыми способами сварки в конструкциях из термически упроченных или нагартованных сплавов. Соединения, выполненные электронно-лучевой сваркой, в этом случае имеют прочность на 15...20% выше, чем при дуговых способах.

При подготовке свариваемых кромок под ЭЛС лучшим способом является шабрение до полного удаления следов предыдущей механической обработки. Эта операция должна быть последней, касаться после шабрения поверхности стыка руками не допускается. Стружку необходимо удалять сухой щеткой. Очистка всей поверхности алюминиевой детали обычно осуществляется травлением в щелочных ваннах.

Наибольшие сложности при ЭЛС алюминиевых сплавов большой толщины создает мощный поток пара и газов из ванны, который увеличивает вероятность высоковольтных пробоев в пушке, вызывает повышенное изнашивание катода в связи с образованием легкоплавких соединений на его поверхности.

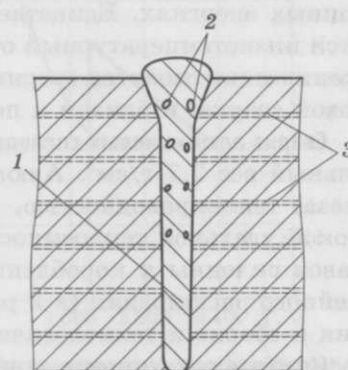
Основным дефектом шва при ЭЛС алюминиевых сплавов, кроме различных нарушений формы, является пористость шва. В качестве причин образования пор рассматриваются следующие факторы: повышенное содержание водорода в свариваемом металле и резкое изменение его растворимости  $W$  в момент кристаллизации ванны (рис. 2.33); влага, адсорбированная поверхностной пленкой и входящая в ее состав в виде гидратированных окислов; легкоиспаряющиеся компоненты сплава.





**Рис. 2.33.** Изменение растворимости водорода  $W$  в алюминии при различных температурах ( $p_{H_2} = 760$  мм рт. ст.):

$T_{пл}$  — температура плавления алюминия



**Рис. 2.34.** Топография пористости в электронолучевом шве сплава 1420 при выраженной слоистости материала:

1 — шов; 2 — поры; 3 — выделения газов из межслойных включений

Кроме указанных ранее факторов при сварке сплава 1420, отличающегося повышенной слоистостью структуры, причиной пористости 2 в шве 1 могут быть выделения газов 3 из межслойных включений (рис. 2.34).

Общие меры борьбы с пористостью при ЭЛС алюминиевых сплавов — тщательная подготовка поверхности свариваемых стыков травлением, шабрением и т. д.; увеличение скорости сварки более 60 м/ч; введение повторного прохода; продольная или круговая осцилляция пучка.

В связи с низким удельным весом алюминиевые сплавы толщиной до 20 мм могут свариваться в нижнем положении без технологических подкладок в диапазоне толщин 20...150 мм. Лучшие результаты дает сварка вертикальными и горизонтальными швами. При толщине более 150 мм предпочтительна сварка горизонтальным пучком снизу вверх (на подъем). При сварке снизу вверх для предотвращения образования внутренних дефектов в виде пустот электронный пучок отклоняют на угол 5...17° от горизонтального положения вниз.

Для сплавов толщиной до 40 мм оптимальным следует считать диапазон скоростей 36...70 м/ч. При толщине более 40 мм сварка может выполняться при скорости 10...30 м/ч. Для компенсации выгорания легкоиспаряющихся компонентов применяют сварку с присадочной проволокой.

**Особенности электронолучевой сварки некоторых сталей.** Малоуглеродистые стали редко сваривают электронным лучом из-за экономической нецелесообразности.

Сварка углеродистых сталей (например, стали 45) толщиной до 10 мм с малыми скоростями и минимально возможной шириной литой зоны позволяет получить качественные швы. Задача значительно усложняется при свар-



ке сталей толщиной более 30 мм. Основные дефекты — горячие и холодные трещины, а также раковины и поры из-за высокого содержания газов.

Высокопрочные низколегированные стали типа 30ХГСА, 30ХГСН2А свариваются ЭЛС со скоростью 12...18 м/ч и круговой осцилляцией пучка. Сразу же после сварки эти стали подвергаются высокому отпуску для снятия сварочных напряжений и предотвращения появления холодных трещин. После сварки и отпуска детали подвергаются упрочняющей термообработке.

Низколегированные теплоустойчивые стали перлитного класса (например, 15Х1М1Ф; 20Х3МВФ; 23ХНВФА; 20Х2НМФА и др.) обычно сваривают электронным лучом в диапазоне скоростей 10...30 м/ч. Стали с содержанием углерода 0,20...0,30 % требуют перед ЭЛС рафинирующего переплава и подогрева в процессе сварки до 150...200 °С.

Значительный интерес для современного машиностроения представляют высоколегированные высокопрочные стали мартенситно-стареющего класса (15Х14Н6Д2МБТ; 03Х11Н8М2Ф; 000Х18К9М5Т и др.). Упрочнение этих сталей осуществляется в два этапа: получение мартенситной структуры в результате превращения  $\gamma \rightarrow \alpha$  и последующее старение с выделением мелкодисперсных упрочняющих фаз в виде карбидов, нитридов и различных сочетаний легирующих элементов. Из-за присутствия в мартенситной структуре большого количества мелкозернистых частиц стали обладают благоприятным сочетанием прочностных и вязкостных характеристик. Стали свариваются в термоупрочненном состоянии и после ЭЛС подвергаются термообработке, что значительно облегчает изготовление деталей. Стали обладают достаточно высокой конструктивной и технологической прочностью, а также низкими значениями сварочных деформаций.

Обычно электронно-лучевую сварку этих сталей осуществляют при скорости 10...20 м/ч. При сварке сталей больших толщин (больше 60 мм) возможно появление срединных трещин, а при сварке горизонтальным лучом — образование раковин в металле шва.

Высоколегированные коррозионно-стойкие стали аустенитного класса (12Х18Н10Т; 12Х18Н9 и др.) в силу своей высокой пластичности достаточно хорошо свариваются электронным лучом в широком диапазоне скоростей сварки и свариваемых толщин (вплоть до 200 мм).

При сварке жаропрочных хромистых сталей мартенситного и мартенситно-ферритного классов (Х12НМБФ-Ш; 1Х12Н2ВМФ; 18Х11МНФБ и др.) получить бездефектные швы значительно сложнее. Стали относятся к категории удовлетворительно свариваемых. На сварку они поступают после упрочняющей термообработки (закалка с последующим отпуском). При сварке неизбежно появление участков разупрочнения, однако при ЭЛС зона разупрочнения имеет небольшую протяженность и не оказывает заметного влияния на общие прочностные характеристики сварного соединения. При сварке сталей этого класса возможно образование холодных трещин в шве и околошовной зоне. Поэтому обязательным условием является отпуск сварных конструкций при температуре 600...700 °С и выдержке не более 5 ч.

# 3

## Состав электронно-лучевых установок

### 3.1 Сварочные камеры

Под термином «установка для ЭЛС» обычно понимают совокупность устройств, приборов и аппаратуры для выполнения всех сварочных и вспомогательных операций. Основными компонентами электронно-лучевых установок (ЭЛУ) являются сварочная (вакуумная, рабочая) камера с внутрикамерными механизмами; вакуумная (откачная) система; энергетический блок (комплекс).

Чаще всего каждый из перечисленных элементов имеет собственную систему электропитания и управления. Поскольку рабочая камера установки одновременно является составной частью вакуумной системы, их объединяют в единый электромеханический комплекс (рис. 3.1).

Кроме вышеперечисленных основных элементов, ЭЛУ дополнительно могут быть оснащены устройствами для наблюдения за процессом, защиты иллюминаторов от напыления, подачи присадочного материала.

Сварочная камера является одним из наиболее важных и трудоемких узлов электромеханического комплекса установки. Корпус камеры имеет проемы для загрузки и выгрузки свариваемых изделий, закрепления сварочной пушки (в случае стационарной пушки), смотровых иллюминаторов, подвижных и неподвижных кинематических вводов, датчиков измерения давления, подсоединения откачных систем и т. д.

Внутри камеры размещаются устройства (манипуляторы) для закрепления и перемещения свариваемого изделия и сварочной пушки.

К конструкции камеры предъявляются следующие требования.

1. Размеры камеры должны быть достаточными для размещения и перемещения изделия и пушки в процессе сварки, и вместе с тем объем камеры должен быть минимальным для сокращения времени откачки.
2. Должен быть обеспечен удобный доступ в рабочую зону при выполнении таких операций, как загрузка и выгрузка свариваемых изделий, ремонт и техническое обслуживание, монтаж приборов, датчиков, механизмов станочного комплекса и т. д.
3. Конструкция камеры и механическая прочность должны гарантировать устойчивость стенок к разности давлений между наружной и внутрен-



ней средой, так как от жесткости камеры зависит точность совмещения луча со свариваемым стыком.

4. Камеры должны иметь быстродействующие устройства для герметизации и обеспечивать герметичность откачиваемого объема.

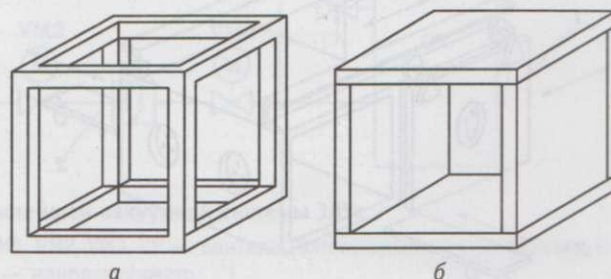
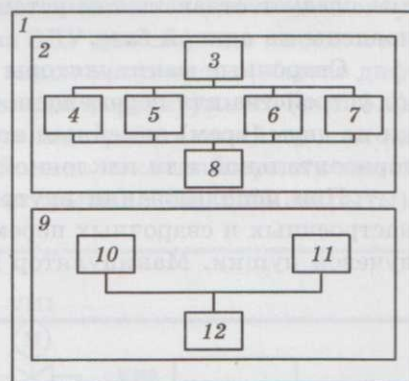
По форме сварочные камеры можно разделить на прямоугольные (куб, параллелепипед) и выполненные в виде тел вращения (цилиндр, диск и т. д.). Преимуществами камер цилиндрического типа являются технологичность их изготовления, повышенная жесткость и устойчивость к деформациям, недостатками — ограниченная применяемость, невысокий коэффициент использования рабочего пространства при работе с внутрикамерной электронной пушкой.

Прямоугольные камеры применяются гораздо чаще, чем цилиндрические, в составе универсальных установок. Объем прямоугольной камеры при необходимости можно увеличить пристыковкой к свободным граням дополнительных секций. По исполнению прямоугольные камеры могут быть каркасными (рис. 3.2, а) и бескаркасными (рис. 3.2, б).

В камерах с каркасным корпусом ребра каркаса соединены вакуум-плотными сварными швами. Для оформления вакуумной камеры грани каркаса уплотняются крышками (съёмными, откидными, откатными). На поверхностях крышек возможен монтаж электронной пушки и механизмов перемещения. Преимущества каркасного корпуса — возможность перестройки полез-

**Рис. 3.1.** Структурная схема установки для ЭЛС:

1 — установка для ЭЛС; 2 — электромеханический комплекс; 3 — вакуумная камера; 4 — вакуумная (откачная) система; 5 — устройство для слежения и наблюдения; 6 — средства подачи присадочного материала; 7 — средства перемещения изделия и пушки; 8 — система управления; 9 — энергетический комплекс; 10 — электронная пушка; 11 — источники питания пушки; 12 — система управления



**Рис. 3.2.** Каркасный (а) и бескаркасный (б) корпуса камер ЭЛУ



ного объема благодаря дополнительным секциям, облегченный доступ внутрь рабочего пространства камеры. Недостатки — увеличенное число вакуумных разъемов и относительно высокая стоимость изготовления.

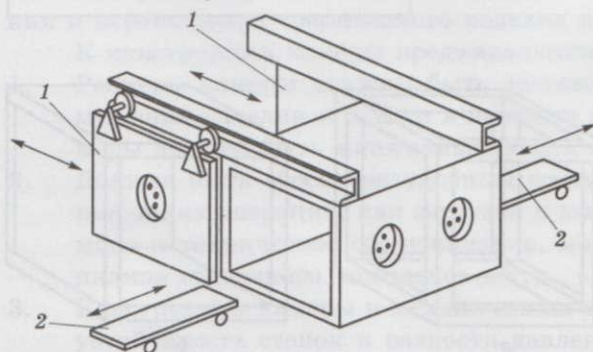
В камерах с бескаркасным корпусом стенки корпуса соединены вакуум-плотными сварными швами. При этом уменьшаются трудоемкость изготовления камеры и число вакуумных разъемов, но одновременно сокращаются возможности изменения объема камеры в случае такой необходимости.

Толщина стенок камеры определяется в основном из условий обеспечения механической прочности и жесткости корпуса. Однако камера выполняет еще и функцию биологической защиты обслуживающего персонала от рентгеновского излучения. В крупногабаритных камерах стенки, рассчитанные из условий механической прочности, обеспечивают и необходимую биологическую защиту. В иллиминаторах для защиты от R-излучения используют стекла с повышенным содержанием свинца.

Обычно корпус сварочной камеры является базой манипуляторов свариваемого изделия и электронной пушки. Причем часто манипулятор изделия и пушка устанавливаются не на общей базе, а на противоположных или смежных стенках, крышке и т. д. В результате деформации камеры могут возникать различные нарушения в работе механизмов. Поэтому предпочтительнее следует отдавать тем установкам, где изделие и сварочная пушка установлены на единой базе.

Сварочные манипуляторы универсальных установок, как правило, имеют устройства для перемещения свариваемого изделия или электронной пушки по двум (трем) линейным координатам и вращения вокруг вертикальной, горизонтальной или наклонной оси.

При использовании внутрикамерных пушек практически все функции настроечных и сварочных перемещений выполняет манипулятор электронно-лучевой пушки. Манипулятор изделия в этом случае служит для фиксации



**Рис. 3.3.** Прямоугольная камера туннельного типа:

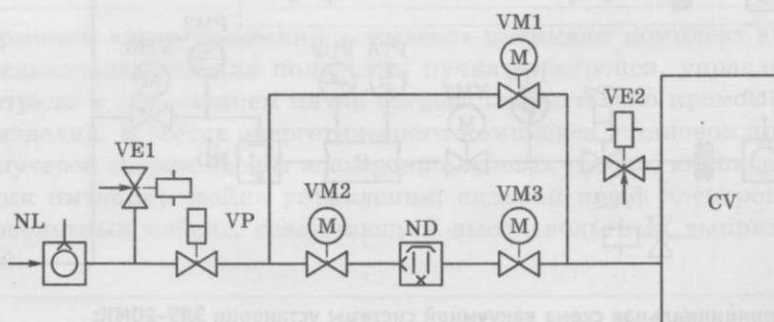
1 — откатные двери; 2 — загрузочные столы

изделия в определенном положении и иногда для его перемещения по одной линейной координате (чаще всего вдоль камеры) или вращения. Загрузочные отверстия камеры закрываются крышками (дверями) различной конструкции (съемные, шарнирные, откатные). В крупногабаритных установках хорошо зарекомендовали себя камеры туннельного типа (рис. 3.3) с двумя загрузочными отверстиями, за откатными дверями 1. Такая схема позволяет использовать два загрузочных стола 2, один из которых вводится в камеру, а на втором в это время готовится к сварке очередное изделие.

## 3.2 Вакуумные системы

Вакуумные системы в установках ЭЛС служат для создания необходимого вакуума в рабочей камере и в области ускорения и проведения электронов в пушке. Вакуумные системы состоят из насосов, коммутирующих элементов (затворов, клапанов, задвижек), вакуум-проводов и вакуумметров. На выбор схемы вакуумной системы и конкретного вакуумного оборудования при проектировании ЭЛУ влияет объем вакуумной камеры; рабочий вакуум в камере; время достижения рабочего вакуума; площадь, отведенная для установки; стоимость установки; вид производства, где предполагается использовать установку.

В простейшем варианте вакуумная система ЭЛУ для сварки в высоком вакууме может состоять из двух насосов: одного высоковакуумного (обычно диффузионного паромасляного) и одного механического форвакуумного (рис. 3.4). В этом случае форвакуумный насос NL, постоянно работающий на выходе высоковакуумного насоса ND, в начальный момент откачки переключается непосредственно на камеру (вентили VP, VM1 открыты, VM2, VM3 закрыты).



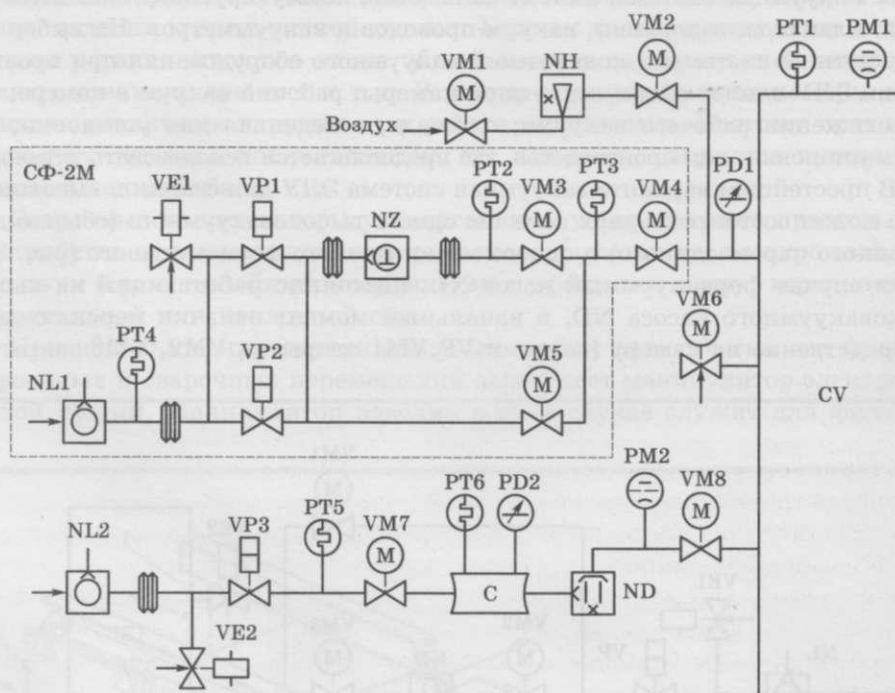
**Рис. 3.4.** Принципиальная схема простейшей вакуумной системы ЭЛУ:

NL — форвакуумный насос; VE1, VE2, VM1, VM2, VM3, VP — вентили (затворы); ND — высоковакуумный насос; CV — вакуумная камера; M — мановакуумметр

После того как вакуум в камере достигнет величины максимального выпускного давления паромасляного насоса (1,0... 0,1 мм рт. ст.), открывается вентиль VM2, и насос NL откачивает одновременно и из камеры, и из диффузионного насоса. При достижении в камере давления, близкого к предельному для механического насоса ( $5 \cdot 10^{-2}$  мм рт. ст.), открывается вакуумный затвор VM3, вентиль VE2 закрывается и начинается откачка из камеры диффузионным высоковакуумным насосом ND.

Недостатки такой вакуумной системы — низкая скорость откачки в начальный момент (при давлении, близком атмосферному); непроизводительная трата электроэнергии при длительном режиме работы форвакуумного насоса; диффузионный насос длительное время работает без откачки форвакуумным насосом. Такие вакуумные системы применяются в установках с небольшим объемом камеры в единичном и опытном производстве.

Для увеличения производительности откачки в вакуумную систему промышленных ЭЛУ включают четыре типа насосов, последовательно включае-



**Рис. 3.5.** Принципиальная схема вакуумной системы установки ЭЛУ-20МК:

CF-2M — станция форвакуумная; NH — воздуходвухструйный насос; VM1—VM8 — затворы; VP1—VP3 — пневмоклапаны; NL1, NL2 — форвакуумные насосы; NZ — двухроторный насос; ND — высоковакуумный насос; CV — вакуумная камера; VE1, VE2 — вентили; PT1—PT6, PM1, PM2 — вакуумметры; M — мановакуумметр; PD1, PD2 — вакуумное реле; C — диффузионный насос



мых в работу по мере снижения давления в камере: эжекторный (воздухоструйный); механический форвакуумный; бустерный (паромасляный типа БН или механический типа ДВН); высоковакуумный. Для откачки камер большого объема применяются вакуумные системы с параллельным включением нескольких единиц однотипных насосов.

В качестве примера на рис. 3.5 приведена принципиальная схема вакуумной системы промышленной установки ЭЛУ-20МК. На первом этапе откачки работает воздухоструйный насос NH, который соединяется с камерой через открытый затвор VM2. При достижении в камере давления 50 кПа (375 мм рт. ст.) включается форвакуумная станция СФ-2М.

Для этого сначала форвакуумный насос NL1 подсоединяется к откачиваемому объему через байпасную линию (с малой проводимостью трубопровода) при открытом пневмоклапане VP1 и затворах VM5 и VM4. При достижении давления 20 кПа (150 мм рт. ст.) открывается пневмоклапан VP2 и производится откачка камеры до давления 4 кПа (30 мм рт. ст.), после чего включается первая скорость двухроторного насоса NZ, закрывается затвор VM5 и открывается VM3.

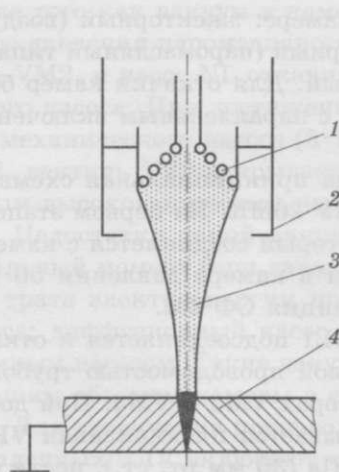
При вакууме в камере 0,67 Па ( $5 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст.) включается откачная линия высоковакуумного насоса ND, а станция СФ-2М отключается. Откачная система установки ЭЛУ-20МК может работать как в режиме ручного управления, так и в автоматическом режиме, когда тот или иной элемент системы включается по сигналам соответствующих датчиков давления. Рабочее давление  $5 \dots 10^{-5}$  мм рт. ст. достигается в камере установки ЭЛУ-20МК в течение 35...40 мин.

### 3.3

## Энергетический комплекс установок для электронно-лучевой сварки

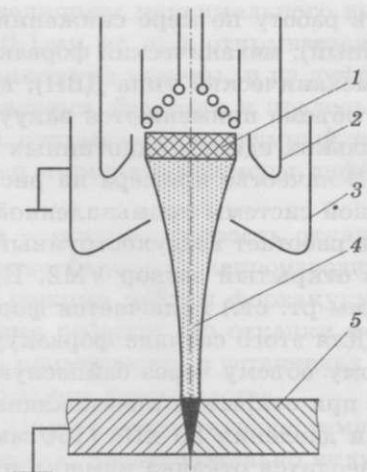
Под термином «энергетический комплекс» понимают комплект аппаратуры, предназначенный для получения пучка электронов, управления его параметрами и положением пятна нагрева относительно кромок свариваемого изделия. В состав энергетического комплекса установок для электронно-лучевой сварки входят электронно-лучевая пушка; высоковольтный источник питания; стойка управления; силовой шкаф электропитания; высоковольтный кабель, соединяющий высоковольтный выпрямитель с пушкой.

Современные энергетические комплексы установок для электронно-лучевой сварки по уровню ускоряющего напряжения подразделяют на низковольтные ( $U_{\text{уск}} < 30$  кВ), с промежуточным ускоряющим напряжением ( $U_{\text{уск}} = 30 \dots 60$  кВ) и высоковольтные ( $U_{\text{уск}} > 60$  кВ).



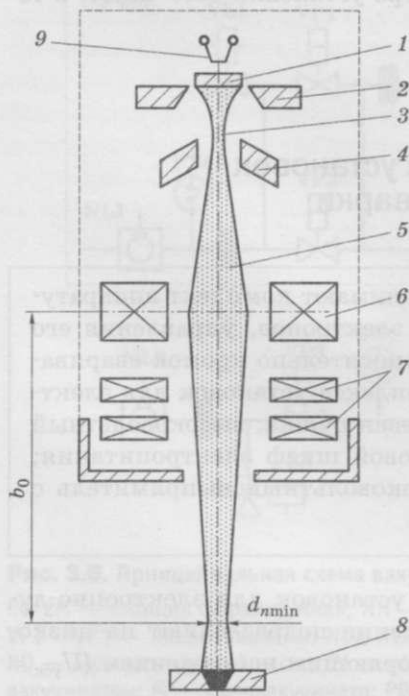
**Рис. 3.6.** Схема однокаскадной электронно-лучевой пушки без ускоряющего электрода:

1 — катод; 2 — прикатодный электрод;  
3 — пучок электронов; 4 — свариваемое изделие



**Рис. 3.7.** Схема однокаскадной электронно-лучевой пушки с ускоряющим электродом — анодом:

1 — катод; 2 — прикатодный электрод; 3 — ускоряющий электрод (анод); 4 — пучок электронов; 5 — свариваемое изделие.



**Рис. 3.8.** Схема электронно-лучевой пушки с комбинированной фокусировкой:

1 — катод; 2 — прикатодный (ускоряющий) электрод; 3 — кроссовер; 4 — анод; 5 — пучок электронов; 6 — фокусирующая система; 7 — отклоняющая система; 8 — свариваемое изделие; 9 — подогреватель катода;  $b_0$  — фокусное расстояние пушки (от середины фокусирующей катушки до минимального сечения луча  $d_{min}$ )

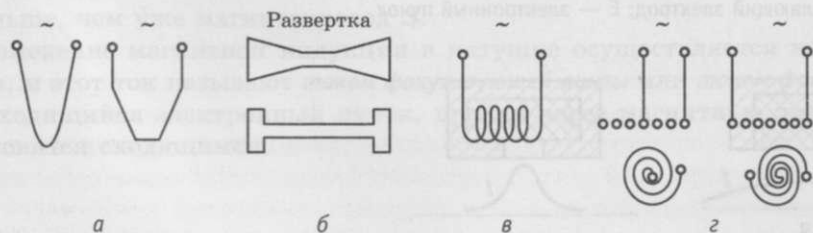
**Сварочная электронная пушка** — электровакуумный прибор, служащий для получения электронных пучков с высокой плотностью энергии в пятне нагрева. В первых пушках для ЭЛС (рис. 3.6) электроны, эмиттированные катодом 1, формировались в пучок электронов 3 только с помощью прикатодного электрода 2, без применения дополнительных фокусирующих систем. Анодом служило само свариваемое изделие 4.

Технологические и электронно-оптические характеристики пушки с однокаскадной электростатической фокусировкой повышаются при введении в ее конструкцию ускоряющего электрода 3 (анода), находящегося под потенциалом изделия (рис. 3.7). Применение ускоряющего электрода 3 позволяет увеличить расстояние между катодом 1 пушки и свариваемым изделием 5.

Наиболее широкое применение при сварке нашли электронно-лучевые пушки с комбинированной (электростатической и электромагнитной) фокусировкой (рис. 3.8). В подобных пушках форму электродов прожектора — катода 1, ускоряющего (прикатодного) электрода 2 и анода 4 — экспериментальным или расчетным путем выбирают такой, чтобы электрическое поле между катодом или анодом не только ускоряло бы пучок электронов 3, но и формировало бы его сходящимся, т. е. фокусированным в точке 3, называемой **кроссовером**. Расположение кроссовера по отношению к аноду зависит от конструкции электродов, но в большинстве случаев он располагается в районе анодного отверстия.

Наиболее часто в сварочных электронно-лучевых пушках используются термоэмиссионные катоды. С целью получения больших плотностей тока для термоэмиссионных катодов применяются материалы, допускающие высокотемпературный нагрев ( $W$ ,  $Ta$ ) или обладающие низким значением работы выхода (гексаборид лантана  $LaB_6$ ).

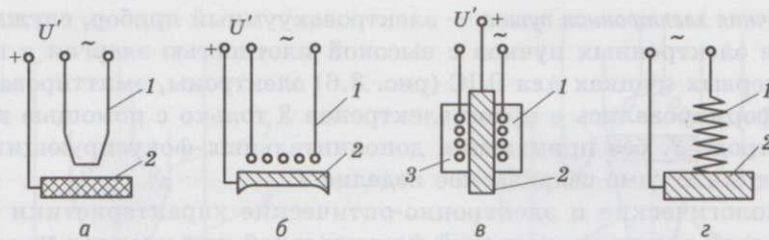
Нагрев катодов может быть прямым благодаря проходящему току (рис. 3.9) и косвенным с помощью электронной бомбардировки или теплового излучения (рис. 3.10). На рис. 3.9, а показан петлевой катод прямого накала с малой эмиттирующей поверхностью. Выполняется он из вольфрамовой проволоки диаметром 0,1 ... 0,3 мм. Недостатком вольфрама является то,



**Рис. 3.9. Прямонакальные катоды:**

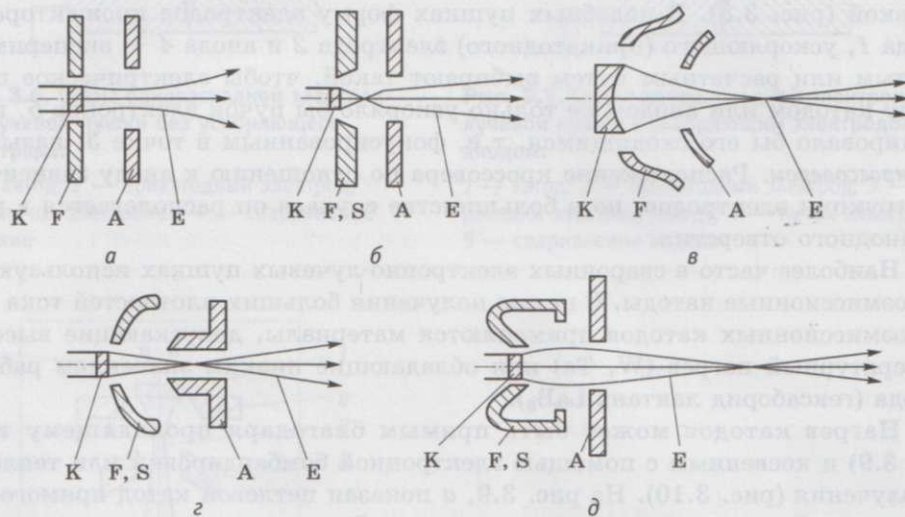
а — проволочный петлевой; б — ленточный; в — цилиндрический спиральный; г — плоский спиральный





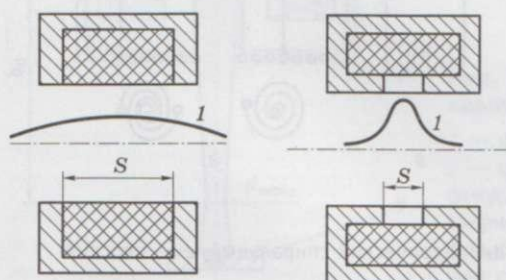
**Рис. 3.10. Катоды с косвенным нагревом:**

*a* — петлевой катод; *б* — ленточный катод; *в* — цилиндрический спиральный катод; *г* — плоский спиральный катод; 1 — вспомогательный катод; 2 — основной катод; 3 — экран;  $U'$  — ускоряющее напряжение электронной бомбардировки



**Рис. 3.11. Принципиальные схемы аксиальных электронных прожекторов:**

*a* — двухэлектродный генератор с плоскими электродами; *б* — трехэлектродный генератор аксиально-симметричной схемы; *в* — двухэлектродный генератор с вогнутым катодом; *г* — излучатель Роговского; *д* — длиннофокусный генератор; А — анод; К — катод; F — фокусирующий электрод; S — управляющий электрод; E — электронный пучок



**Рис. 3.12. Примеры осесимметричных магнитных фокусирующих линз:**

1 — график распределения магнитной индукции; S — магнитопровод

что после нескольких циклов нагрева он охрупчивается и уже не поддается механической коррекции. Поэтому иногда для проволочных катодов применяют ковкие вольфрамниевые сплавы.

Ленточные катоды (рис. 3.9, б) прямого накала с малой эмиттирующей поверхностью, как правило, изготавливают из танталовой или вольфрамовой фольги толщиной 0,05...0,2 мм. Цилиндрические спиральные катоды с большой поверхностью эмиссии (рис. 3.9, в) изготавливают из проволоки или отожженной фольги. Плоские спиральные катоды (рис. 3.9, г) могут иметь различную величину эмиттирующей поверхности.

Основную роль в формировании электронного пучка в сварочной пушке играет система электродов, которую называют *электронным прожектором*. Простейший из них — двухэлектродный генератор с плоскими электродами (рис. 3.11, а), в котором прикатодный электрод находится под одним потенциалом с катодом. Его ток можно регулировать путем изменения температуры катода или ускоряющего напряжения.

В большинстве сварочных электронных пушек используется трехэлектродная аксиально-симметричная схема (рис. 3.11, б), состоящая из катода, управляющего электрода и анода. Более сложная двухэлектродная система (рис. 3.11, в) имеет вогнутый катод с большой эмиттирующей поверхностью и фокусирующий электрод специальной формы. Разновидностями трехэлектродного прожектора являются излучатель Роговского (рис. 3.11, г), позволяющий управлять током пучка без существенных изменений его геометрии, и длиннофокусный генератор (рис. 3.11, д).

В качестве фокусирующих систем в электронно-лучевых пушках применяют электромагнитные линзы, которые действуют на проходящие через них электроны. Конструктивно магнитные фокусирующие линзы представляют собой круглые катушки (рис. 3.12), размещенные в осесимметричном магнитопроводе с зазором. Роль магнитопровода в такой катушке состоит в концентрации магнитного поля на более короткой длине и в повышении его напряженности. Магнитная индукция в катушке пропорциональна числу ампервитков ( $nI$ , где  $n$  — число витков,  $I$  — ток) и при прочих равных условиях тем больше, чем уже магнитопровод  $S$ .

Изменение магнитной индукции в катушке осуществляется изменением тока, и этот ток называют *током фокусирующей линзы* или *током фокусировки*  $I_{\text{ф}}$ . Расходящийся электронный пучок, пройдя через магнитную линзу, снова становится сходящимся.



# 4

## Лазерная сварка

### 4.1

#### Особенности формирования сварного соединения

Лазерное излучение обеспечивает высокую концентрацию энергии, значительно превосходящую другие источники энергии, используемые для сварки. Лазерная сварка принципиально отличается от электронно-лучевой сварки тем, что не требует вакуумных камер. Процесс лазерной сварки осуществляется на воздухе либо в среде защитных газов.

Лазерный луч с помощью зеркальных оптических систем легко транспортируется и направляется на свариваемое изделие. На лазерный луч не влияют магнитные поля свариваемых деталей и технологической оснастки. Для сварки металлов используются твердотельные и газовые лазеры как периодического, так и непрерывного действия.

Благодаря высокой концентрации энергии лазерного излучения в процессе сварки обеспечивается малый объем расплавленного металла, незначительные размеры околошовной зоны термического влияния, высокие скорости нагрева и охлаждения металла.

Лазерная сварка осуществляется в широком диапазоне режимов, обеспечивающих соединение различных металлов толщиной в пределах 0,02...8 мм.

Методы лазерной сварки классифицируют по трем основным признакам: энергетическим, технико-экономическим и технологическим.

Основными энергетическими признаками, характеризующими лазерную сварку, являются плотность мощности лазерного излучения и длительность воздействия. При непрерывном лазерном излучении длительность воздействия определяется временем экспозиции, а при импульсном излучении — длительностью импульса.

Технико-экономические признаки характеризуют эффективность лазерных методов сварки. К технико-экономическим признакам относятся скорость сварки, экономия материала, локальность сварки.

Лазерная сварка непрерывным излучением осуществляется на скоростях, в несколько раз превышающих традиционные методы сварки плавлением. Это условие экономически целесообразно не только благодаря высокой производительности процесса, но и вследствие малых затрат энергии на еди-



ницу погонной длины шва, определяемых низким значением погонной энергии, т.е. отношением мощности излучения к скорости сварки. Однако при лазерной сварке импульсным излучением скорость процесса значительно ниже, чем при сварке непрерывным излучением, и практически сопоставима со скоростями при традиционных методах сварки.

Экономия материала при лазерной сварке больших толщин достигается путем применения непрерывного излучения. Например, дуговая сварка стык листа толщиной 15...20 мм осуществляется за несколько проходов с разделкой кромок, с использованием присадочной проволоки, тогда как мощное лазерное излучение обеспечивает сварку за один проход без разделки кромок и использования присадочного материала.

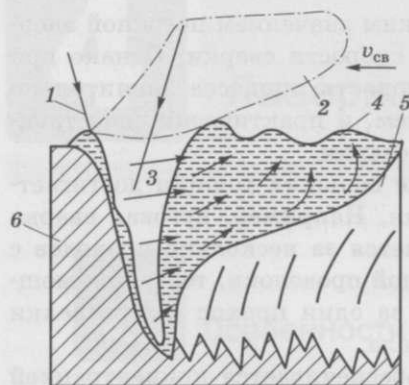
Локальность процесса лазерной сварки обеспечивается концентрацией излучения в пятно малых размеров диаметром 0,1 мм и менее. Благодаря этому условию имеют место малая ширина шва, незначительные пластические деформации. Малые размеры швов, выполненных лазерной сваркой, позволяют весьма экономно проектировать сварные детали и конструкции.

Технологические признаки удобно рассмотреть применительно к двум основным видам проплавления при лазерной сварке: глубокое проплавление при сварке материала толщиной  $\delta > 1$  мм; незначительное проплавление при сварке материала толщиной  $\delta < 1$  мм. Сварка с глубоким проплавлением может быть выполнена как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режиме излучения.

При лазерной сварке с присадочным материалом, используемым для целей легирования металла шва или снижения требований по точности сборки, применяют порошок или тонкую проволоку диаметром 1,0...1,5 мм. При этом необходимо обеспечить точную подачу проволоки в зону плавления. Лазерная сварка с глубоким проплавлением осуществляется в большинстве случаев с защитой шва.

В зависимости от конструктивного оформления соединяемых деталей используется сварка со сквозным проплавлением в основном в ответственных силовых конструкциях и без сквозного проплавления для герметизации или для соединения тонких деталей с массивными деталями. Лазерная сварка может беспрепятственно выполняться в различных пространственных положениях.

Сложным является механизм формирования сварного соединения при сварке с глубоким проплавлением. При плотности мощности лазерного излучения выше критической скорость нагрева материала значительно превосходит скорость отвода теплоты путем теплопроводности. При этом происходят процессы локального плавления и испарения материала, вследствие чего формируется углубление на поверхности, и при достаточной мощности источника оно развивается по глубине, что приводит к образованию канала, заполненного парами материалов и окруженного жидким металлом. Давление паров материала оказывается достаточным для поддержания канала, и полость канала не заполняется жидким металлом под действием гидростатического давления и сил поверхностного натяжения.



**Рис. 4.1.** Продольное сечение сварочной ванны

1 — лазерное излучение; 2 — плазменный факел; 3 — парогазовый канал; 4 — хвостовая часть сварочной ванны; 5 — закристаллизованный металл; 6 — свариваемый материал;  $v_{св}$  — скорость сварки

При образовании канала над поверхностью материала появляется светящийся факел, состоящий из продуктов испарения и выброса, а также частиц конденсированного пара. Наличие плазменного факела существенно влияет на эффективность проплавления. В условиях атмосферного давления на проплавление влияет состав газа, что учитывается при выборе защитного газа для лазерной сварки.

Продольное сечение сварочной ванны при лазерной сварке с глубоким проплавлением представлено на рис. 4.1. Видно, что сварочная ванна имеет характерную форму, вытянутую в направлении сварки. В головной части ванны расположен парогазовый канал или кратер 3, заполненный парами металла. Эта область наиболее яркого свечения. На передней стенке канала существует слой расплавленного металла, который испытывает постоянные возмущения. Здесь наблюдается характерное искривление передней стенки в виде ступеньки, которая периодически перемещается по высоте канала. Удаление расплавленного материала с передней стенки осуществляется при перемещении ступеньки сверху вниз. Перенос расплавленного металла из головной части в хвостовую происходит преимущественно по боковым стенкам канала в горизонтальном направлении. Кроме этого наблюдаются восходящие потоки движения по мере углубления канала. В хвостовой части ванны расплавленный металл завихряющимися потоками поднимается вверх и частично выносится на поверхность сварочной ванны.

В процессе лазерной сварки над поверхностью сварочной ванны наблюдается ярко светящееся облако — плазменный факел 2, размеры и яркость свечения которого периодически изменяются с частотой порядка сотен герц. При значительных скоростях лазерной сварки факел отклоняется в сторону, противоположную направлению сварки, на  $20 \dots 60^\circ$ .

Процессы переноса расплавленного металла в сварочной ванне оказывают существенное влияние на формирование шва, образование характерных дефектов и механические свойства сварного соединения. Основной силой, воздействующей на расплавленный металл и обеспечивающей его перенос, счита-



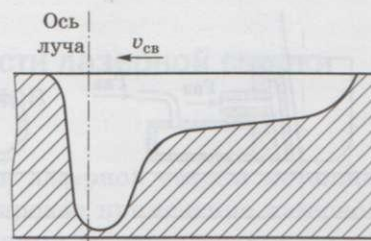
ется сила реакции паров. Под действием этой силы жидкий металл перемещается как сверху вниз по передней стенке канала, так и в горизонтальном направлении вокруг канала. Перенесенный расплавленный металл обнажает участки металла с более низкой температурой на передней стенке канала, после чего процессы плавления и переноса повторяются. Экспериментально установлено, что скорость переноса жидкого металла существенно превышает скорость сварки и при скорости сварки 2...5 мм/с достигает 1000...2000 мм/с. Перенос жидкого металла в канале проплавления носит дискретный характер.

## 4.2 Сварка металлов с глубоким проплавлением

Механизм формирования сварного соединения при сварке металлов с глубоким проплавлением характеризуется наличием парогазового канала. Основными параметрами режимов лазерной сварки с глубоким проплавлением являются мощность лазерного излучения, скорость сварки, параметры фокусирующей системы.

Мощность излучения влияет на проплавляющую способность и характер формирования шва. Для целей сварки лазерное излучение фокусируется в пятно диаметром 0,5...1,0 мм. При меньшем диаметре пятна происходит значительный перегрев расплавленного металла шва, усиливается испарение легирующих элементов и в шве появляются дефекты. При диаметре сфокусированного лазерного излучения более 1,0 мм снижается эффективность нагрева изделия при сварке.

Оптимальной для сварки с глубоким проплавлением является «кинжальная» форма поперечного сечения шва. Параметры шва также зависят от положения фокальной плоскости относительно поверхности свариваемых деталей. Максимальная глубина проплавления достигается при расположении фокуса под поверхностью материала. Оптимальная величина этого смещения фокуса зависит от свойств материала, толщины деталей и режимов сварки.



**Рис. 4.2.** Продольное сечение сварочной ванны при лазерной сварке:

$v_{св}$  — скорость сварки

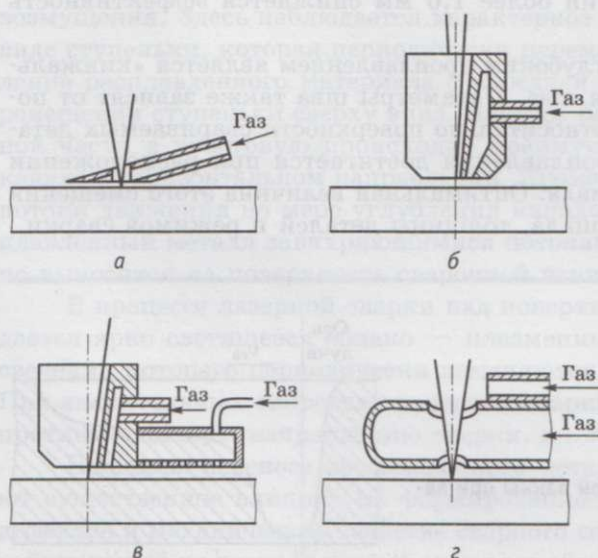


Продольное сечение сварочной ванны имеет специфическую форму (рис. 4.2). Поверхность фронта кристаллизации отличается наличием выступа твердой фазы, который делит ванну на две характерные части. Нижняя часть ванны значительно заглублена и имеет малую протяженность в поперечном сечении, тогда как верхняя часть — более широкая и вытянута вдоль шва. Такая форма продольного сечения свидетельствует о наличии двух процессов проплавления металла при лазерной сварке. Первый процесс заключается в образовании парогазового канала при воздействии лазерного излучения на изделие. Второй процесс представляет собой поверхностное плавление металла. Преимущественное развитие того или иного из указанных процессов определяет очертавание сварочной ванны и зависит в первую очередь от режимов сварки.

Принципиальной особенностью лазерного источника нагрева является высокая степень концентрации энергии, обеспечивающая сварку на повышенных скоростях. Этим достигается незначительное тепловое воздействие на околошовную зону, высокие скорости нагрева и охлаждения металла сварного соединения.

Выполнение лазерной сварки со скоростью 25...30 мм/с обеспечивает существенное снижение остаточных деформаций по сравнению со способами дуговой сварки. При лазерной сварке значения сжимающих напряжений в околошовной зоне оказываются на 40...70% ниже, чем при дуговой сварке.

Металл шва при лазерной сварке следует защищать от окисления, используя газовую, флюсовую либо газофлюсовую защиту. Газовая защита осу-



**Рис. 4.3.** Конструкция защитных сопел:

*а* — сопло в виде наклонной трубки; *б* — соосное сопло; *в* — соосное сопло с дополнительной защитной камерой; *г* — сопло с патрубком сдува плазменного облака

ществляется подачей защитного газа через сопло непосредственно в зону воздействия лазерного излучения на материал. Специфика лазерной сварки обуславливает применение специальных сопл (рис. 4.3) и составов защитных газов. При сварке со сквозным проплавлением для ряда высокоактивных металлов требуется также защита корня шва.

В качестве защитных газов при лазерной сварке могут быть использованы те же газы, что и при дуговой сварке. Газы, имеющие более высокие потенциал ионизации и теплопроводность, обеспечивают максимальную эффективность проплавления. Качество защиты обеспечивается соответствующим расходом газа.

Наряду с газовой защитой шва при лазерной сварке можно использовать флюсы, причем можно рекомендовать те же составы, которые используют при дуговой сварке. При лазерной сварке целесообразно использовать флюсы в виде обмазок.

Важным технологическим приемом при лазерной сварке с глубоким проплавлением является использование присадочного материала. Это дает возможность регулировать химический состав шва, обеспечивая требуемые свойства сварных соединений, исключить неравномерность проплавления, поры в корне шва, горячие и холодные трещины, а также снизить требования к точности сборки деталей под сварку. Лазерная сварка с присадкой выполняется теми же приемами, что и дуговая. Особенность заключается в использовании присадочной проволоки малого диаметра (менее 1,0 мм) и в точной подаче ее под лазерное излучение с помощью специальных механизмов.

При сварке с глубоким проплавлением встречаются дефекты в виде неравномерности проплавления корня шва и наличия полостей по высоте проплава. Увеличение скорости сварки при несквозном проплавлении приводит к снижению пикообразования в корне шва. Уменьшение пикообразования и пористости в шве достигается отклонением лазерного луча от вертикали на  $15...17^\circ$  по направлению движения луча. При сварке со сквозным проплавлением неравномерность проплава можно устранить путем вывода проплавления на остающиеся или удаляемые подкладки.

Эффективность проплавления может быть увеличена подачей непосредственно в зону сварки дополнительного потока газа под определенным давлением. Дополнительный поток оказывает влияние на параметры плазмы в области взаимодействия излучения с материалом и на гидродинамические процессы в канале проплавления.

#### 4.3

### Технологические особенности лазерной сварки конструкционных материалов

В настоящее время отработана технология лазерной сварки металлов малых и средних толщин до 10 мм. Однако широкое применение лазерной сварки в ряде случаев сдерживается соображениями экономического харак-



тера. Стоимость технологических лазеров пока еще достаточно высока, что требует тщательного выбора области применения лазерной сварки. Перспективу для лазерной сварки представляют такие случаи, когда применение традиционных способов сварки не дает желаемых результатов либо технически невозможно. Лазерную сварку можно рекомендовать к применению в следующих случаях:

- получение прецизионной конструкции, форма и размеры которой практически не должны изменяться в результате сварки;
- значительное упрощение технологии изготовления сварных конструкций путем выполнения сварки в виде заключительного процесса без последующих операций правки либо механической обработки для достижения требуемой точности;
- существенное увеличение производительности, так как процесс осуществляется на скоростях 35 мм/с и более, что в несколько раз превышает скорость наиболее распространенного традиционного способа дуговой сварки;
- сварка крупногабаритных конструкций малой жесткости с труднодоступными швами, при этом в отличие от ЭЛС не требуются вакуумные камеры;
- соединение трудносвариваемых материалов, в том числе разнородных.

При изготовлении сварных конструкций нашли широкое распространение низкоуглеродистые стали с содержанием углерода до 0,25 % и низкоуглеродистые низколегированные стали, в которых суммарное содержание легирующих элементов не превышает 4,0 %, а содержание углерода — 0,25 %. Рекомендуются высокопроизводительные режимы лазерной сварки на больших скоростях ( $v_{св} = 30 \dots 40$  мм/с), обеспечивающие высокое сопротивление образованию горячих и холодных трещин.

При лазерной сварке низкоуглеродистых и низколегированных сталей обеспечивается равнопрочность шва с основным металлом при высоких значениях пластичности и ударной вязкости.

Среднеуглеродистые стали содержат 0,26 ... 0,45 % углерода и широко используются для изготовления сварных конструкций. Высокоуглеродистые стали содержат 0,46 ... 0,75 % углерода, отличаются плохой свариваемостью и редко применяются в сварных конструкциях. Конструкционные легированные стали имеют суммарное содержание легирующих элементов в пределах 2,5 ... 10 %.

Для сталей этого класса характерной особенностью при сварке является образование закалочных структур в шве и зоне термического влияния, склонных к хрупким разрушениям, возможность возникновения горячих и холодных трещин в сварном соединении и пор в металле шва.

Лазерная сварка по сравнению с дуговой обеспечивает более высокую сопротивляемость металла шва образованию горячих трещин, в особенности при больших скоростях сварки ( $v_{св} > 30$  мм/с), и повышенные механические свойства сварных соединений. Отличительной особенностью является минимальное разупрочнение в околосшовной зоне термоупрочненных сталей. В частности, предел прочности сварных соединений из термоупрочненных сталей 12Х2Н4А; 18ХГТ, выполненных лазером, на 32 ... 45 % выше, чем при дуговой сварке.



Высоколегированные стали содержат более 10 % легирующих элементов. Главной особенностью сварки этих сталей является склонность к образованию в шве и околошовной зоне горячих трещин, связанных в основном с формированием крупнозернистой структуры. Основные мероприятия, повышающие сопротивляемость стали этого типа образованию горячих трещин, следующие: применение методов сварки, способствующих измельчению кристаллов и устранению столбчатой структуры; получение в структуре швов некоторого количества  $\delta$ -феррита; снижение содержания примесей в швах. Применение лазерной сварки во многих случаях позволяет реализовать указанные условия и обеспечить отсутствие горячих трещин.

При лазерной сварке стали 12X18H10T структура шва характеризуется малым размером зерен, фазовый состав сварного шва содержит 10...20 %  $\delta$ -феррита в отличие от основного металла. Прочность сварных соединений из этой стали находится на уровне основного металла, а пластичность — несколько выше вследствие пониженного содержания неметаллических включений.

Для изготовления ответственных сварных конструкций широкое применение находят мартенситно-стареющие коррозионно-стойкие стали. Сварные соединения этих сталей, выполненные дуговой сваркой, склонны к коррозионному растрескиванию и межкристаллитной коррозии.

Применение лазерной сварки на скоростях более 35 мм/с обеспечивает сокращение времени пребывания металла в зоне термического влияния при высоких температурах до 1 с. В результате значительно повышается коррозионная стойкость сварных соединений, выполненных лазером.

Алюминиевые сплавы обладают малой плотностью, высокой удельной прочностью и высокой коррозионной стойкостью. Они применяются в качестве конструкционных материалов в различных отраслях промышленности.

Сварка алюминиевых сплавов имеет свою специфику. Алюминий интенсивно окисляется при температуре плавления и выше. Окисная пленка обладает высокой температурой плавления и в процессе сварки не расплавляется. Эта пленка характеризуется высокой адсорбционной способностью к газам и парам воды, что приводит к появлению в сварочной ванне газов и различных несплошностей. Частицы окисной пленки могут попадать в ванну, образуя окисные включения в швах, снижающие свойства сварных соединений.

При сварке алюминиевых сплавов возможно образование пор, источником которых является водород. Для уменьшения пористости используют рациональную обработку поверхностей перед сваркой с целью удаления влаги, адсорбированной поверхностью металла и входящей в состав окисной пленки в виде гидратированных оксидов.

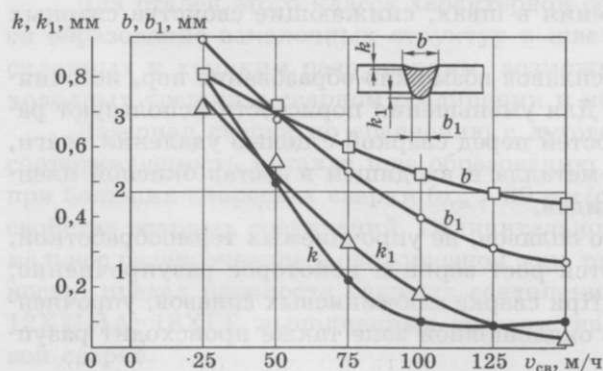
При сварке алюминия и его сплавов, не упрочняемых термообработкой, в околошовной зоне наблюдаются рост зерна и некоторое разупрочнение, вызванное снятием нагартовки. При сварке алюминиевых сплавов, упрочненных термической обработкой, в околошовной зоне также происходит разупрочнение.

Наиболее полно исследована лазерная сварка сплавов системы Al—Mg. Для получения качественного сварного соединения, прежде всего, необходима тщательная подготовка поверхности под лазерную сварку. Предусматривается удаление жировой смазки, которой покрываются полуфабрикаты при консервации, с последующей механической обработкой торцов свариваемых кромок. Пленку окислов удаляют на ширину 25...30 мм по всей длине соединения травлением в растворе 50 г NaOH в 1 л воды с последующим осветлением в 30%-ном растворе HNO<sub>3</sub>. После травления детали тщательно промывают в горячей воде. Очищенная поверхность сохраняет свои свойства в течение 3—4 дней. Непосредственно перед сваркой соединяемые поверхности необходимо зачистить шабером до блеска. Такая подготовка поверхности позволяет избежать образования дефектов при сварке, в первую очередь пористости и оксидных включений.

Максимальная глубина проплавления и высокое качество шва обеспечиваются при использовании гелия в качестве защитного газа. *Причем обязательна защита шва с обеих сторон.* В целях экономии допускается использование гелия для защиты только верхней части сварочной ванны, а для нижней, корневой, части может быть использован аргон.

Основой получения качественных сварных соединений является правильный выбор параметров режимов сварки. Для сплава АМг6 мощность СО<sub>2</sub>-лазера 2,0...2,2 кВт обеспечивает глубину проплавления 1,5...2,0 мм. При меньшей мощности излучения проплавление вообще отсутствует. Это явление представляет собой сочетание высокого коэффициента отражения высокой теплопроводности и теплоемкости алюминия.

Благоприятная форма шва с минимальным размером расплавленной зоны обеспечивается оптимизацией режимов лазерной сварки (рис. 4.4). При этом требуется получить необходимую геометрию шва: понижение  $k$ , провисание



**Рис. 4.4.** Зависимость геометрических параметров формы шва от скорости сварки:

$b$  — ширина шва;  $b_1$  — ширина проплава;  $k$  — занижение шва;  $k_1$  — провисание шва;  $v_{св}$  — скорость сварки

**Таблица 4.1.** Режимы сварки алюминиевого сплава АМг6

| Толщина металла $\delta$ , мм | Мощность излучения $P$ , кВт | Скорость сварки $v_{св}$ , мм/с | Фокусное расстояние $F$ , мм |
|-------------------------------|------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| 2,0                           | 2,1                          | 25                              | 120                          |
|                               | 2,3                          | 33                              | 120                          |
| 3,0                           | 2,3                          | 25                              | 140                          |
|                               | 2,8                          | 33                              | 140                          |
| 4,0                           | 2,8                          | 25                              | 140                          |
|                               | 3,1                          | 33                              | 140                          |

сание  $k_1$ , ширину шва  $b$  и ширину проплава  $b_1$ . Занижение и провисание шва обычно задаются техническими условиями, на ответственных изделиях они не должны превышать 10 % толщины материала. Соотношение ширины верхней и корневой частей шва является оптимальным при их равенстве.

При лазерной сварке такая форма шва обеспечивается на скоростях сварки более 22 мм/с. На пластине из сплава АМг6 толщиной 2,0 мм достигается проплавление с практически параллельными кромками при ширине шва около 2 мм, занижение и провисание шва находятся в допустимых пределах. С увеличением мощности излучения и глубины проплавления ширина шва увеличивается незначительно. Оптимальные режимы сварки излучением  $CO_2$ -лазера алюминиевого сплава представлены в табл. 4.1.

Микроструктура металла сварных соединений, выполненных лазерным излучением на оптимальных режимах, значительно отличается от микроструктуры металла соединений, полученных дуговой сваркой. В шве имеет место мелкодисперсная структура со столбчатыми дендритами, причем размеры дендритов значительно меньше, чем при аргонодуговой сварке. Выделение эвтектики и оплавление границ зерен в непосредственной близости от шва не наблюдаются. Структурные изменения в зоне термического влияния при лазерной сварке происходят на участке в 5—6 раз меньшем, чем при аргонодуговой сварке. Размер зерна в этой зоне увеличивается незначительно. Подобная структура является благоприятной для достижения высокого уровня механических свойств и предотвращения горячих трещин.

Сплавы магния, имеющие высокую удельную прочность при низкой плотности, используют в качестве конструкционных материалов. Отличительной особенностью процесса сварки магния является повышенная жидкотекучесть его расплава и почти полная потеря прочности металла при температуре твердожидкого состояния. Это вызывает необходимость применения при дуговой сварке прокладок из меди или коррозионно-стойкой стали с целью получения удовлетворительного формирования шва.

Лазерная сварка устраняет указанные затруднения и обеспечивает высокое качество сварных соединений. Технология сварки магниевых сплавов принципиально не отличается от сварки алюминиевых сплавов. Перед сваркой соединяемые кромки необходимо протравить или зачистить шабером до



**Таблица 4.2.** Режимы сварки магниевого сплава МА2-1

| Толщина металла $\delta$ , мм | Мощность излучения $P$ , кВт | Скорость сварки $v_{св}$ , мм/с | Фокусное расстояние $F$ , мм |
|-------------------------------|------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| 1,8                           | 2,0                          | 28                              | 112                          |
| 1,2                           | 2,3                          | 36                              | 112                          |

блеска. Применение лазерного излучения обеспечивает хорошее формирование швов при сварке на весу. Это значительно упрощает технологию изготовления сварных конструкций, особенно крупногабаритных. Качественное формирование шва обеспечивается сваркой на оптимальных скоростях в диапазоне 16...35 мм/с. В табл. 4.2 представлены режимы лазерной сварки магниевого сплава.

Защита шва от окисления осуществляется гелием, подаваемым в верхнюю часть ванны, и аргоном, используемым только для защиты нижней корневой части шва.

Микроструктуры сварных соединений характеризуются отсутствием крупных зерен в зоне термического влияния. Переход от основного металла к сварному шву в зоне сплавления происходит с плавным изменением структуры от двухфазной, характерной для основного металла, до игольчатой в сварном шве. Механические свойства сварных соединений, выполненных лазерным излучением, находятся на уровне основного металла.

Титановые сплавы находят широкое применение при изготовлении сварных конструкций. Основная трудность при сварке титана и его сплавов заключается в высокой химической активности металла при высокой температуре и в расплавленном состоянии. Повышение содержания в шве и основном металле газов увеличивает склонность сварных соединений из титановых сплавов к образованию холодных трещин. Кроме этого титановые сплавы проявляют склонность к росту зерна при нагреве до высоких температур.

Большое значение при сварке титана имеет тщательная подготовка свариваемых кромок фрезерованием либо точением. Применяют комплексную обработку для удаления газонасыщенной пленки: дробеструйную или пескоструйную обработку с последующим химическим травлением, осветлением и промывкой. Качественное формирование шва обеспечивается подгонкой свариваемых деталей и строгим соблюдением допустимых зазоров между кромками.

При лазерной сварке деталей из титановых сплавов необходимо осуществлять их защиту, как с верхней, так и с нижней стороны. При этом обязательно следует защищать не только сварочную ванну, но и остывающие участки металла шва и околошовной зоны до температуры 400...500 °С, что обеспечивается использованием сопла с дополнительным хвостовиком для подачи защитного газа. Для защиты зоны сварки применяют инертные газы высокой степени чистоты или бескислородные фторидно-хлоридные флюсы. Для защиты поверхности шва используется гелий, а для защиты остывающей поверхности шва и его корня можно использовать аргон.

**Таблица 4.3. Режимы сварки титановых сплавов**

| Марка сплава | Толщина металла $\delta$ , мм | Мощность излучения $P$ , кВт | Скорость сварки $v_{св}$ , мм/с | Фокусное расстояние $F$ , мм |
|--------------|-------------------------------|------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| BT6          | 3,0                           | 3,0                          | 22                              | 300                          |
|              | 5,0                           | 4,0                          | 22                              | 300                          |
| BT22         | 2,0                           | 4,0                          | 44                              | 230                          |
|              | 3,0                           | 3,3                          | 27                              | 150                          |
| ПТ-3В        | 4,0                           | 4,0                          | 44                              | 500                          |
|              | 5,0                           | 4,0                          | 27                              | 150                          |

Рекомендуется выполнять лазерную сварку титановых сплавов на повышенных скоростях (более 25 мм/с). При уменьшении скорости сварки увеличивается ширина шва, образуются неблагоприятные структуры, повышается вероятность насыщения металла вредными газами и увеличивается склонность к образованию холодных трещин. Режимы лазерной сварки некоторых титановых сплавов представлены в табл. 4.3.

Никель и никелевые сплавы (55 % Ni и более) являются важнейшими конструкционными материалами. Благодаря высокой коррозионной стойкости, жаропрочности и жаростойкости их широко используют в химической и нефтяной промышленности, энергетике, электронике и других отраслях промышленности. Применяются в основном сплавы на никелевой основе следующих групп.

Жаростойкие сплавы (нихромы) обладают повышенной стойкостью к коррозии в газовых средах при повышенных температурах. Сплавы этой группы хорошо свариваются всеми видами сварки, в том числе и лазерной.

Жаропрочные сплавы имеют повышенные прочностные свойства при высоких температурах по сравнению со сплавами на железной основе. Повышение свариваемости возможно путем сокращения времени высокотемпературного нагрева при снижении погонной энергии или увеличении скорости сварки. В результате этого исключается растворение упрочняющих фаз в околошовной зоне и выпадение этой фазы в процессе охлаждения в шве.

Лазерная сварка на скоростях 120...150 м/ч дает возможность получать длительную жаропрочность соединений без последующей термической обработки. Коэффициент снижения эксплуатационных свойств по отношению к основному металлу у соединений, полученных лазерной сваркой, составляет 0,9, тогда как при аргодуговой сварке он равен 0,77.

При лазерной сварке никелевых сплавов в качестве защитного газа используют гелий или смесь гелия с аргоном в соотношении 1:3. Для предотвращения пористости в гелий можно добавлять до 20 % водорода.

Сборка под сварку должна обеспечивать минимальные зазоры и перекосы кромок. Следует избегать стыковых соединений с отбортовкой кромок, так как образующиеся в этом случае с обратной стороны шва «карманы» могут вызвать появление щелевой коррозии при эксплуатации изделий.

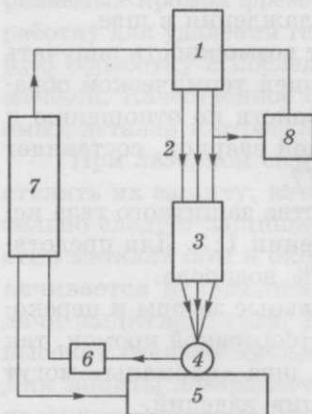


Оборудование для лазерной сварки в частности включает в себя следующие основные элементы: технологический лазер; систему отклонения и фокусировки луча; систему наблюдения; оснастку для крепления и перемещения детали; средства контроля за параметрами процесса. Все эти элементы входят в состав лазерной технологической установки (рис. 4.5).

Основным элементом оборудования является технологический лазер. Для сварки металлов малых толщин (до 1,5 мм) целесообразно применение твердотельных лазеров, так как они имеют меньшие потери мощности благодаря отражению излучения, просты в эксплуатации, надежны и имеют небольшие габаритные размеры. Недостатком этих лазеров является ограниченная мощность (до 500 Вт). Для больших толщин, где требуется сварка в режиме глубокого проплавления, наиболее целесообразно применение газовых, преимущественно  $\text{CO}_2$ -лазеров. Подобные лазеры долговечны, надежны и обеспечивают достаточно высокий уровень выходной мощности.

Отклоняющие системы служат для изменения направления луча от источника до детали. В состав отклоняющих систем входят призмы полного внутреннего отражения, интерференционные зеркала с многослойными диэлектрическими покрытиями, медные зеркала. При выборе или конструировании отклоняющих систем необходимо учитывать возможность их нагрева вследствие поглощения излучения. Например, оптические стекла могут использоваться до плотности мощности излучения  $10^3 \text{ Вт/см}^2$ , медные зеркала (при соответствующей массе) могут выдержать значительно большие плотности мощности.

Фокусирующая система служит для создания необходимой плотности мощности на поверхности детали.



**Рис. 4.5.** Структурная схема лазерной технологической установки:

1 — технологический лазер; 2 — лазерное излучение; 3 — оптическая система; 4 — обрабатываемая деталь; 5 — устройство для крепления и перемещения детали; 6 — датчики параметров технологического процесса; 7 — программное устройство; 8 — датчики параметров излучения



Система наблюдения служит для слежения, контроля и наведения излучения на обрабатываемую точку. Существуют две основные схемы систем наблюдения: система наблюдения соосна с фокусирующей системой, система наблюдения расположена под углом к фокусирующей системе. Соосная система выполняется путем соответствующей установки отклоняющих зеркал и призм, полупрозрачных зеркал или зеркал с отверстиями. Такая схема применена в системе наблюдения СОК-2, которой оснащены установки серий КВАНТ. Соосные системы наблюдения применяются преимущественно для лазеров с длиной волны излучения в ближней инфракрасной области.

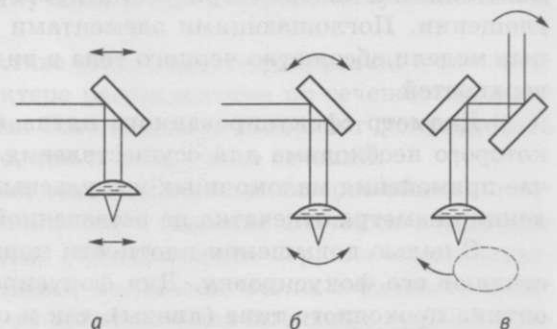
Из несоосных систем наиболее рационально использование оптического микроскопа, расположенного под углом к падающему излучению, или специальной телевизионной установки. Помимо рассмотренных функций оптическая система может обеспечивать перемещение, расщепление, сканирование и модуляцию луча.

В большинстве случаев относительное перемещение детали и источника нагрева осуществляется благодаря движению детали. Однако в случае высоких скоростей сварки и увеличенных габаритных размеров деталей удобнее использовать систему перемещения луча. Это позволяет уменьшить массу подвижных узлов, что облегчает управление их перемещением, способствует повышению точности обработки.

Перемещение луча достигается следующими методами (рис. 4.6, *a — в*): использованием системы отклоняющих зеркал; изменением угла наклона зеркала по отношению к оптической оси; круговым вращением системы зеркал вместе с объективом.

Разделение луча осуществляется бипризмами. Расщепленным лучом можно одновременно обрабатывать несколько участков поверхности детали. Применение системы зеркал позволяет разделять лучи большой мощности.

Отклонение зеркала с определенной частотой от оси действия луча позволяет сканировать его по поверхности детали, обеспечивая, например, сварку с колебаниями луча, широко используемую в практике электронно-лучевой сварки. Оснастка для крепления и перемещения детали состоит из различного рода манипуляторов и приспособлений для закрепления и установки деталей в нужном положении.



**Рис. 4.6.** Схема перемещения луча по неподвижной детали:

*a* — перемещение отклоняющего зеркала вдоль детали; *б* — колебания отклоняющего зеркала; *в* — круговое вращение системы зеркал

Технологические возможности установок в значительной степени зависят от типа и конструкции манипуляторов, которыми они оснащены. Для сварки применяют в основном вращатели с различным позиционированием оси вращения и двухкоординатные столы плоского перемещения. Высокие требования к точности позиционирования связаны с достижением необходимой точности взаимных перемещений изделия и луча. В связи с крайне малым диаметром луча требуется точность в пределах 0,02...0,10 мм. Если отклонение превысит допустимую величину, луч сместится со свариваемого стыка и сварное соединение не образуется.

В лазерной сварке применимы практически все типы универсальных и специальных приспособлений, известных и применяемых в технологии сварки, точность базирования которых не превышает 0,1...0,2 мм. Основой любого сборочного приспособления является жесткий каркас с упорами, фиксаторами и прижимами. При сборке детали заводят в приспособление, укладывают по упорам или фиксаторам и закрепляют прижимами. Использование того или иного типа сборочно-установочных приспособлений определяется конструкцией изделия, принятой технологией изготовления и программой выпуска.

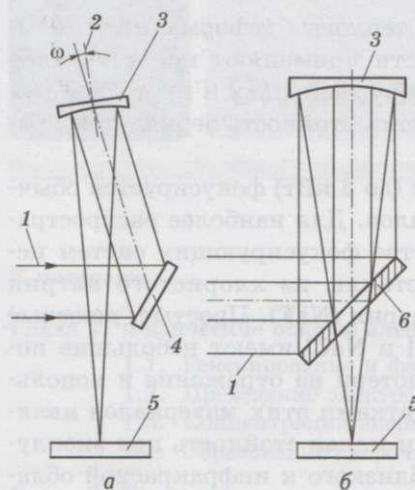
Измерение параметров лазерного излучения необходимо производить для контроля режимов сварки в процессе изготовления изделий. Энергетические параметры излучения измеряются тепловыми и фотоэлектрическими методами. К тепловым методам относятся калориметрический, болометрический, термоэлектрический и пироэлектрический, которые позволяют производить абсолютные измерения мощности и энергии. Фотоэлектрические методы основаны на применении приемников излучения, в которых поглощаемое излучение вызывает электрически регистрируемый процесс.

Наибольшее распространение получили тепловые методы, основанные на измерении температуры нагрева поглотителя с помощью термопары, термостолбика, болометра или термосопротивления. При измерении выходных параметров лазерного излучения калориметрическим методом необходимо добиваться максимального поглощения оптической энергии в нагрузке. В качестве поглотителя используются твердые тела, жидкости или газы. Большинство калориметрических приборов основано на поверхностном поглощении. Поглощающими элементами в калориметрах являются различные модели абсолютно черного тела в виде конусов, сфер или рифленых поверхностей.

Диаметр сфокусированного пятна является параметром, регистрация которого необходима для осуществления технологического процесса. В случае применения маломощных импульсных лазеров используют метод определения диаметра отпечатка на засвеченной фотобумаге.

С целью повышения плотности мощности лазерного излучения осуществляют его фокусировку. Для фокусировки применяется как прозрачная оптика проходного типа (линзы), так и отражательная металлооптика (зер-





**Рис. 4.7.** Системы сварки с одиночными фокусирующими зеркалами:

*a* — фокусирующее зеркало наклонено к лучу под углом  $\omega$ ; *б* — фокусирующее зеркало соосно с лучом; 1 — лазерный луч; 2 — ось зеркала; 3 — фокусирующее сферическое зеркало; 4 — плоское зеркало; 5 — свариваемая деталь; 6 — плоское кольцевое зеркало;  $\omega$  — угол наклона оси зеркала к оси луча

кала). Фокусирующие прозрачные линзы используются при малых мощностях лазерного излучения (до 3 кВт). При повышенных мощностях лазерного излучения все шире начинают использоваться зеркальные фокусирующие системы из металлооптики, обеспечивающие значительно больший срок службы. Зеркальные фокусирующие системы используются в виде одиночного фокусирующего зеркала или какого-либо варианта двухзеркального объектива.

Лазерная сварка с фокусировкой одиночным зеркалом может осуществляться по схемам, представленным на рис. 4.7. На рис. 4.7, *a* фокусирующее сферическое зеркало 3 установлено под углом  $\omega$  к оси падающего излучения. В данной схеме использовано дополнительно плоское зеркало 4, которое необходимо при обработке крупногабаритных деталей. Если обрабатываемые детали имеют небольшие размеры, то лазерное излучение можно направлять непосредственно на фокусирующее сферическое зеркало. На схеме рис. 4.7, *б* используется плоское кольцевое зеркало 6, а фокусирующее сферическое зеркало 3 установлено соосно с падающим излучением. Эту схему фокусировки целесообразно использовать в тех случаях, когда лазерное излучение имеет кольцевое сечение.

В обращенном внеосевом объективе отсутствует экранировка, и вся энергия излучения независимо от характера распределения по сечению луча достигает обрабатываемой поверхности. Этот объектив позволяет фокусировать лазерные излучения как сплошного, так и кольцевого сечений.

Зеркальная оптика для мощных технологических лазеров обычно изготавливается из чистой меди, обеспечивающей высокие значения коэффициентов отражения и теплопроводности. Металлические зеркала изготавливают достаточно массивными и жесткими, чтобы они могли выдержать высокий уровень лазерного излучения и не допустили значительных тепловых де-



формаций поверхности зеркал. Для снижения тепловых деформаций и повышения стойкости в лазерах большой мощности применяют искусственное охлаждение медных зеркал водой. Использование защитных и многослойных просветляющих покрытий позволяет увеличивать стойкость зеркал при хранении и эксплуатации.

Лазерное излучение небольшой мощности (до 3 кВт) фокусируется обычно линзами из оптически прозрачных материалов. Для наиболее распространенных технологических  $\text{CO}_2$ -лазеров в качестве фокусирующих систем используются искусственные оптические кристаллы из хлористого натрия (NaCl), хлористого калия (KCl), фтористого натрия (NaF). Простые, дешевые в изготовлении линзы из монокристаллов KCl и NaCl имеют небольшие показатели преломления, обеспечивают малые потери на отражение и используются без покрытий. Существенными недостатками этих материалов являются их гигроскопичность, низкая прочность и малая стойкость при эксплуатации. Фокусировка видимого излучения и близкого к инфракрасной области излучения осуществляется стеклянными линзами.

# Оглавление

|   |           |
|---|-----------|
| К читателю .....  | 3         |
| <b>Глава 1. Физические основы электронно-лучевой сварки .....</b>                             | <b>4</b>  |
| 1.1. Генерирование и формирование электронных пучков .....                                    | 4         |
| 1.2. Проведение электронов до обрабатываемой поверхности .....                                | 5         |
| 1.3. Концентрация энергии пучка до нужной плотности .....                                     | 6         |
| 1.4. Образование сварочной ванны .....  | 7         |
| <b>Глава 2. Технология электронно-лучевой сварки .....</b>                                    | <b>11</b> |
| 2.1. Основные виды сварных соединений при электронно-лучевой сварке ...                       | 11        |
| 2.2. Параметры режима электронно-лучевой сварки и их влияние<br>на размеры сварного шва ..... | 14        |
| 2.3. Сварка в различных пространственных положениях .....                                     | 17        |
| 2.4. Сварка в режиме сквозного проплавления .....   | 18        |
| 2.5. Сварка с колебанием пучка .....  | 20        |
| 2.6. Сварка кольцевых швов .....  | 20        |
| 2.7. Электронно-лучевая сварка изделий переменного сечения .....                              | 22        |
| 2.8. Технологические возможности сварки с двойным преломлением<br>луча .....                  | 24        |
| 2.9. Дефекты сварных соединений при электронно-лучевой сварке .....                           | 24        |
| 2.10. Особенности электронно-лучевой сварки различных металлов<br>и сплавов .....             | 29        |
| <b>Глава 3. Состав электронно-лучевых установок .....</b>                                     | <b>36</b> |
| 3.1. Сварочные камеры .....   | 36        |
| 3.2. Вакуумные системы .....  | 39        |
| 3.3. Энергетический комплекс установок для электронно-лучевой<br>сварки .....                 | 41        |
| <b>Глава 4. Лазерная сварка .....</b>   | <b>46</b> |
| 4.1. Особенности формирования сварного соединения .....                                       | 46        |
| 4.2. Сварка металлов с глубоким проплавлением .....   | 49        |
| 4.3. Технологические особенности лазерной сварки конструкционных<br>материалов .....          | 51        |
| 4.4. Оборудование для лазерной сварки .....   | 58        |