

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ВОЛОГОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

В.К. Черкасов

**НЕДУГОВЫЕ СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ
МАТЕРИАЛОВ
В СВАРОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**

*Утверждено редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия*

Вологда

2014

УДК 621.791.
ББК 34.64
Ч 48

Рецензенты:

Гарш Е.И., канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергетические средства и технический сервис» Вологодской государственной молочнохозяйственной академии им. Н.В. Верещагина

Викулов В.А., директор Вологодского регионального центра по аттестации специалистов сварочного производства

Черкасов, В.К.

Ч48 **Недуговые способы обработки материалов в сварочном производстве:** учебное пособие / В.К. Черкасов. – Вологда: ВоГУ, 2014. – 83с.

В пособии рассматривается сущность процессов обработки материалов способами, составляющими номенклатуру сварочного производства. За основу анализа способов принято понятие о триединстве механического, теплового и физико-химического воздействий. Материал всех разделов пособия излагается в одном содержательном ключе, хотя и с разной степенью детализации: сущность процесса, технологические свойства и возможности, зависимость параметров режима от конкретного сочетания свойств обрабатываемого материала и условий выполнения, состав поста для осуществления процесса, рациональные области применения. Специальное внимание уделено раскрытию новых для учащегося терминов. Пособие предназначено для студентов, обучающихся по специальности 080502.65 и направлениям подготовки 222000.62 (27.03.05), 080200.62 (38.03.02), и может быть полезно студентам других специальностей при выполнении курсового и дипломного проектирования.

УДК 621.791.
ББК 34.64

©ВоГУ, 2014
©Черкасов В.К., 2014

Оглавление

Предисловие.....	4
Введение.....	4
1. Классификация способов сварки плавлением.....	6
2. Газопламенная (газовая) сварка.....	8
2.1. Сущность и процесс газовой сварки.....	8
2.2. Состав поста для газовой сварки.....	13
2.3. Технология ручной газовой сварки.....	15
2.3.1. Параметры режима газовой сварки и их регулирование.....	15
2.3.2. Типы соединений, выполняемых газовой сваркой.....	16
2.3.3. Подготовка заготовок к газовой сварке.....	17
2.3.4. Техника газовой сварки.....	18
2.3.5. Оборудование для газовой сварки.....	19
3. Газопламенная пайка.....	26
3.1. Сущность процесса газопламенной пайки.....	26
4. Другие применения газопламенного нагрева.....	28
4.1. Газокислородная и керосинокислородная резка сталей.....	28
4.1.1. Сущность и процесс кислородной резки металлов.....	28
4.1.2. Состав поста для кислородной резки (КР).....	30
5. Электрошлаковая сварка.....	32
5.1. Сущность и процесс электрошлаковой сварки (ЭШС).....	32
5.2. Состав поста электрошлаковой сварки.....	34
5.3. Технология ЭШС.....	36
5.4. Оборудование для ЭШС.....	42
6. Плазменная обработка материалов.....	44
6.1. Сущность и процесс плазменной обработки.....	44
6.2. Состав поста для плазменной обработки.....	47
6.3. Технологические свойства и возможности плазменной обработки.....	49
6.4. Области применения плазменной обработки материалов.....	49
6.5. Оборудование для ПО.....	50
7. Лазерная обработка материалов.....	53
7.1. Сущность и процесс лазерной обработки.....	53
7.2. Природа и свойства лазерного излучения.....	53
7.3. Генерация лазерного излучения и формирование лазерного луча.....	56
7.4. Классификация лазеров.....	59
7.5. Технологическое применение лазеров.....	60
7.6. Лазерная сварка и наплавка.....	63
7.8. Лазерная резка и термораскалывание.....	65
7.8. Лазерная поверхностная термообработка (ЛПТ).....	67
7.9. Лазерное гравирование.....	69
7.10. Лазер как техническое устройство.....	69
8. Электронно-лучевая обработка.....	76
8.1. Сущность электронно-лучевой обработки материалов.....	76
8.2. Пост электронно-лучевой обработки.....	77
8.3. Элементы технологии и области применения ЭЛО.....	78
9. Термитные процессы обработки.....	80
9.1. Сущность термитного процесса.....	80
9.2. Технология термитной сварки.....	81
Заключение.....	83

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее пособие является заключительной частью комплекта из 2-х пособий по способам сварки плавлением. Первая часть под названием «Электродуговые способы сварки плавлением» [1] вышла в 2007 г. Пособие входит в комплекс пособий по технологическим дисциплинам, предназначенным для студентов, обучающихся по специальности 080502.65 и направлениям подготовки 222000.62 (27.03.05), 080200.62 (38.03.02) и может быть использовано студентами других специальностей и направлений при необходимости ознакомиться со способами сварки в процессе курсового и дипломного проектирования.

ВВЕДЕНИЕ

Народное хозяйство страны, призванное обслуживать нужды ее населения, составляют сельскохозяйственный комплекс, топливно-энергетический комплекс, горно-добывающий комплекс, транспортный комплекс, строительный комплекс, военно-промышленный комплекс, комплекс по производству предметов бытового назначения, коммуникационный комплекс.

Функционирование этих составляющих народного хозяйства взаимосвязано по многим направлениям. Вместе с тем, все они базируются на применении разнообразных машин, и поэтому в современном мире важнейшая отрасль народного хозяйства – машиностроение. В свою очередь, машиностроение основано на разнообразных способах обработки материалов при изготовлении деталей машин, которые по признаку общности процессов группируются в специализированные производства:

- литейное,
- кузнечно-прессовое,
- сварочное,
- механообрабатывающее и др.

В число процессов и способов обработки сварочного производства входят:

- сварка металлов и неметаллов,
- наплавка металлов,
- тепловая резка металлов и неметаллов,
- пайка металлов,
- склеивание металлов,
- комбинированные процессы.

Сварка – один из способов неразъёмного неподвижного соединения материальных фрагментов в процессе изготовления деталей машин и сооружений, при возведении сооружений, при их ремонте и восстановлении. Основной отличительной чертой сварки как процесса соединения является воссоздание в месте объединения фрагментов (далее – заготовок) того же типа материальных связей, того же типа межатомного и межмолекулярного взаимодействия, которые присущи самому материалу заготовок. В результате сварки между заготовками исчезают поверхности раздела и они превращаются в один фрагмент единой природы.

Основная технологическая задача, решаемая в процессе сварки – создание условий для начала и завершения межатомного взаимодействия по соприкасаемым поверхностям заготовок. Известно, что межатомное взаимодействие возможно только при сближении атомов до расстояний порядка периода кристаллической решётки (для металлов – 0,1 ... 0,7 нм). Такое сближение возможно либо в расплаве, либо при механическом сдавливании чистых поверхностей.

Если в качестве существенного отличительного признака принять основной фактор, обеспечивающий сварку, то все её многочисленные способы разделяются на две группы:

- способы сварки плавлением и
- способы сварки давлением.

В пособии рассматриваются способы сварки плавлением и другие процессы сварочного производства, в которых применяются недуговые источники тепла: факел горящего газа при газопламенной обработке, расплавленный перегретый шлак при электрошлаковых способах, пятно нагрева на поверхности заготовок от лучевых носителей энергии, расплавленный металл, горящий металл.

Материал всех разделов излагается в одном содержательном ключе, хотя и с разной степенью детализации:

- сущность процесса,
- состав поста для осуществления процесса,
- технологические свойства и возможности процесса (ТСВ),
- техника осуществления процесса,
- типичная технология и режимы процесса,
- основное и вспомогательное оборудование,
- рациональные области применения,
- особые случаи применения и модификации процесса,
- вопросы для самопроверки по разделу,
- рекомендуемая литература.

Содержание понятия «технологические свойства и возможности» способа обработки:

- соотношение видов воздействия (теплового, механического, физико-химического), создаваемого способом обработки, то есть указание на то, какое воздействие является основным, какое – вспомогательным, какое – сопутствующим;

- характер обработки – для некоторых способов является единственным (например, для сварки только сварка), а для других – многовариантным (например, для плазменной обработки – сварка, резка, напыление);

- виды обрабатываемых материалов – металлы вообще, металлы вообще за исключением некоторых конкретных, конкретные виды металлов, неметаллы и т.п.;

- сортамент, то есть совокупная характеристика форм и размеров сечений (профилей); обычно важным показателем является диапазон толщин;

- сопутствующие воздействия на материал и заготовки (изделия) – влияние на структуру, механические свойства и т.п., – и способы преодоления результатов неблагоприятных сопутствующих воздействий;

- среды и условия, в которых возможно применение способа;

- ограничения по применению способа – принципиальные, связанные с природой процессов в способе, и конкурентные;

- производительность способа в адекватных единицах измерения;

- возможность роботизации;

- уровень экологичности;

- интегральная характеристика предпочтительной области применения.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ СПОСОБОВ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ

В предлагаемом учебном пособии в качестве базового технологического процесса выбрана сварка; другие способы обработки рассматриваются как варианты использования элементов сварочного процесса. Поэтому рассмотрим вначале классификацию способов сварки.

Существенными отличительными признаками классификации способов сварки плавлением являются:

- форма подводимой энергии,

- способ передачи энергии,

- форма используемой энергии,

- вид источника тепла,

- расположение источника тепла,

- степень механизации процесса сварки,
- характер и способ применения сварочных материалов и др.

По форме подводимой энергии способы сварки плавлением могут быть электрическими и химическими.

По способу передачи энергии способы сварки плавлением могут быть проводниковыми, газоструйными, металлоструйными, лучевыми и совмещёнными.

По форме используемой энергии все способы сварки плавлением относятся к тепловым.

По виду источника тепла способы сварки плавлением могут быть электродуговыми, газопламенными, шлаковыми, с формированием источника непосредственно на поверхности заготовки, реактивными.

По расположению источника тепла относительно заготовок способы сварки плавлением могут быть с внешним и внутренним источником.

По степени механизации процесса сварки способы сварки плавлением могут быть ручными, механизированными и автоматическими.

По характеру и способу использования сварочных материалов способы сварки плавлением могут быть с использованием присадочных материалов или без использования.

История появления и развития способов сварки вообще и недуговых способов, в частности, обусловлены, с одной стороны, потребностью в технически осуществимых и экономически приемлемых способах и, с другой стороны – уровнем научного понимания самого процесса соединения, а также развитием производства необходимых материалов.

Судя по археологическим данным, разные способы сварки могли быть осуществлены в довольно отдалённые времена, но впоследствии эти знания утрачивались. Можно сказать, что способы и технологии проходят две стадии: интуитивно-феноменологическую и стадию целенаправленной разработки. По современным представлениям в отдалённые времена господствовал опытно-интуитивный подход в освоении способов обработки материалов, и знания сводились к накоплению суммы «производственных секретов». В наше время на базе достаточно высокого уровня понимания природы новые процессы обработки, как правило, проектируются для достижения заранее поставленных целей.

Исторически сложившиеся названия способов сварки в той или иной мере отражают приведенные выше признаки классификации. Из способов сварки плавлением, получивших промышленное применение, отметим и далее будем рассматривать:

- газопламенную,

- электрошлаковую (ЭШС),
- электронно-лучевую,
- лазерную и
- термитную сварку.

Как было отмечено, к числу процессов сварочного производства относятся не только способы сварки, но и другие способы обработки, прежде всего, тепловые способы резки, а также напыление и термообработка. Поэтому все способы обработки разделим в дальнейшем рассмотрении по источнику тепла:

- газопламенные,
- электрошлаковые,
- плазменные,
- лазерные,
- электронно-лучевые,
- термитные способы обработки.

2. ГАЗОПЛАМЕННАЯ (ГАЗОВАЯ) СВАРКА

2.1. Сущность и процесс газовой сварки

Газовая сварка – один из процессов газопламенной обработки материалов, которая состоит в том или ином целенаправленном воздействии факелом горящего в кислороде или воздухе газа или пара.

Сущность процесса газовой сварки металла (рис. 2.1) состоит в том, что факелом 2 горящего в кислороде газа сближенные кромки соединяемых заготовок 1 нагреваются на ограниченном участке до температуры плавления, образуя между заготовками перемышку из жидкого металла, так называемую *сварочную ванну* 3, а при удалении или перемещении факела далее по контуру кромок расплавленный металл сварочной ванны затвердевает, образуя *металл сварного шва* 4.

Сварочная ванна перемещается вслед за факелом, и это перемещение носит квазистационарный характер, так как в головной части сварочной ванны плавятся новые участки соединяемых кромок, а в хвостовой её части с такой же скоростью идёт кристаллизация и образование металла сварного шва, так что размеры и форма сварочной ванны остаются неизменными. Эта картина характерна для всех способов сварки плавлением с последовательным наращиванием сварного шва.

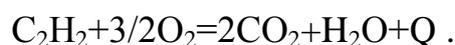
Как правило, в зону формирования сварочной ванны со стороны вводится дополнительный, присадочный металл, чаще всего в виде проволоки 5. Это необходимо, чтобы заполнить зазор между заготовками и восполнить металл кромок, предварительно скошенный по технологическим соображениям.

С использованием факела горящего газа или пара могут выполняться сварка плавлением, пайка, термообработка и подогрев металла перед началом кислородной резки.

При газовой сварке используется химическая энергия окислительно-восстановительной экзотермической реакции в смеси горючего газа или пара и чистого кислорода (горение). В качестве горючего может быть применён любой горючий природный или искусственно полученный газ или пар легко испаряющегося горючего вещества (бензина, керосина, спирта).

Практическое применение находят те из них, которые дают температуру сгорания, существенно превышающую температуру плавления большинства конструкционных металлических материалов и, прежде всего, сталей; такими горючими материалами являются газы ацетилен (C_2H_2), пропан (C_3H_8) и бутан (C_4H_{10}), природный газ метан (CH_4), водород и пары керосина.

Впервые применил ацетилено-кислородное пламя для сварки французский исследователь Анри Ле Шателье в 1902 году. Реакция горения стехиометрической смеси ацетилена с кислородом:



Заранее приготовленная горючая смесь в виде струи подаётся к месту сварки и там после воспламенения образует факел, который и становится источником тепла.

Являясь по отношению к свариваемым заготовкам внешним источником тепла, факел нагревает поверхность заготовок, как за счёт лучеиспуска-

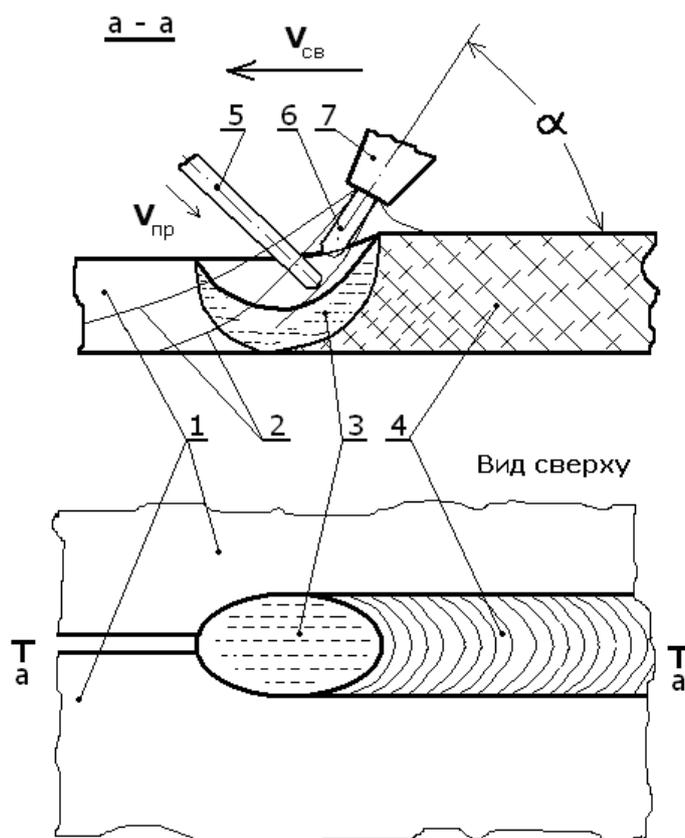


Рис. 2.1

ния, так и за счёт конвективного теплообмена. С поверхности заготовок тепло распространяется вглубь за счёт теплопроводности материала заготовок. Процесс распространения тепла и распределение температуры в толще свариваемых заготовок зависит от соотношения интенсивностей подвода тепла от факела и отвода тепла в массу заготовки. Это соотношение выбирают таким, чтобы обеспечить перемещение изотермы температуры плавления материала заготовок на заданную глубину. Чаще всего за такую глубину принимают толщину кромок соединяемых заготовок, чтобы достичь *сквозного проплавления*. Объём металла, находящийся при сварке в расплавленном состоянии, принято называть сварочной ванной. «Дно» сварочной ванны является изотермической поверхностью температуры плавления (кристаллизации). Затвердевший металл сварочной ванны становится металлом сварного шва.

Температура в факеле горящего газа распределяется неравномерно. В зоне подготовки горючая смесь подогревается до температуры воспламенения. Видимое исходящее из горелки ядро пламени (рис. 2.2) является поверхностью воспламенения. В зоне основного горения (рис. 2.2) происходит горение газа за счёт кислорода смеси. Наибольшая температура достигается на расстоянии 2 ... 3 мм от ядра пламени (около 3150 °С при использовании ацетилена). Именно эта часть факела должна располагаться на поверхности заготовок. В зоне дожига (рис. 2.3) в горении участвует также кислород окружающего воздуха.

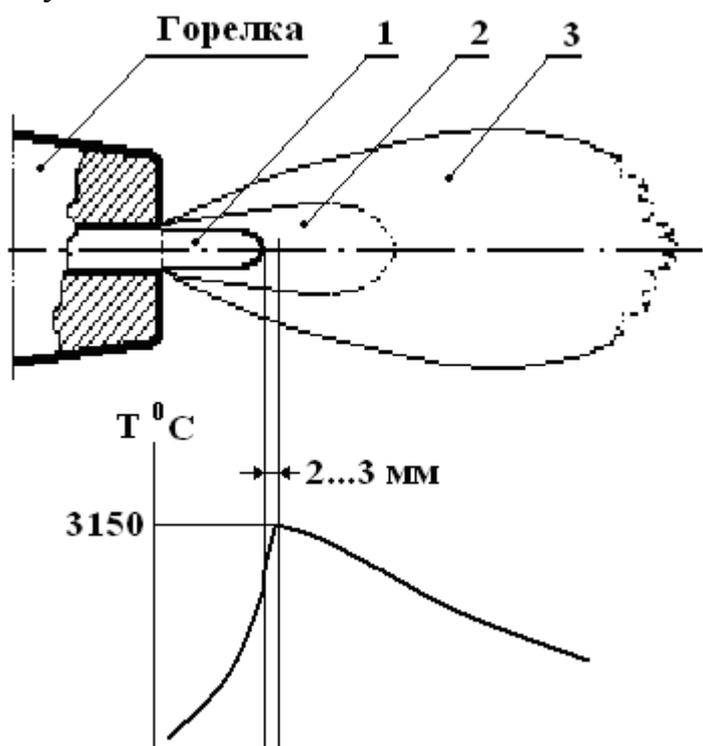


Рис. 2.2

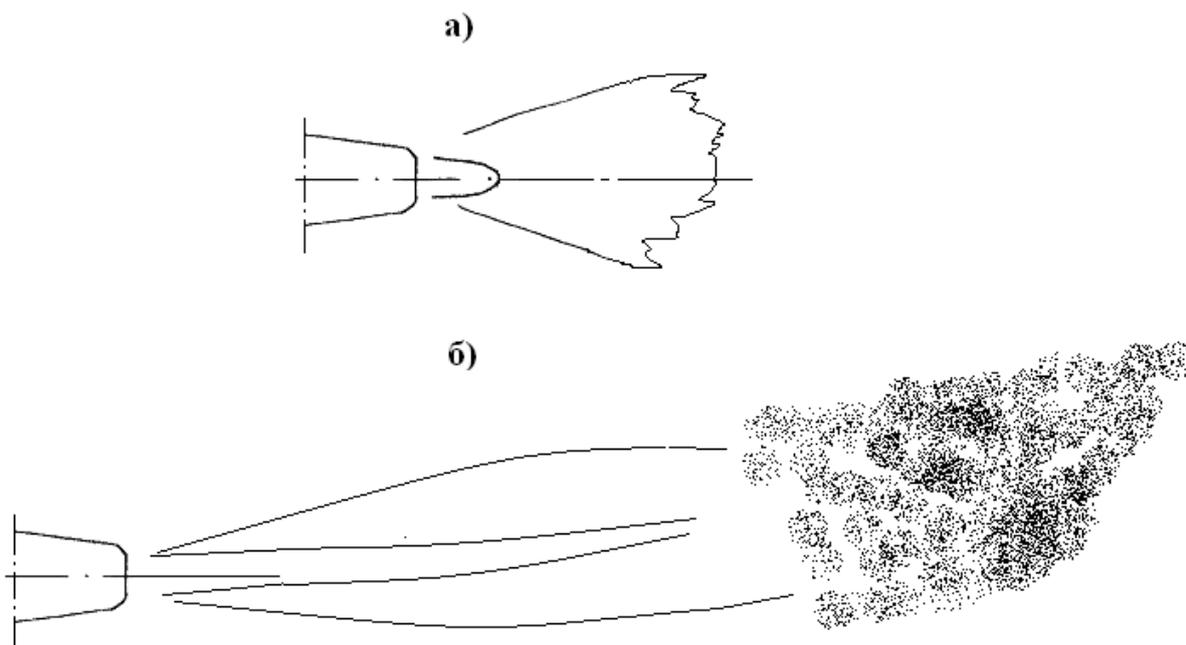


Рис. 2.3

Конфигурация факела и распределение в нём температуры зависят от фактического соотношения долей горючего газа и кислорода в подаваемой горючей смеси.

Стехиометрическая горючая смесь даёт *нормальное* пламя, которое, с одной стороны, оттесняет от места сварки окружающий воздух, а с другой – почти не содержит каких-либо окислительных компонентов в продуктах горения. Поэтому в металле сварочной ванны и в сварном шве не содержится оксидов. Показанный на рис. 2.2 факел соответствует нормальному пламени.

При избытке кислорода в горючей смеси он интенсивно окисляет как металл в сварочной ванне, так и металл только что образовавшегося сварного шва. Факел пламени укорачивается из-за отсутствия зоны дожига и становится светло-голубым, почти бесцветным (рис. 2.3, а). Такое пламя называется *окислительным*. Металл шва насыщается оксидами, и его механические свойства, особенно пластичность, существенно снижаются.

При избытке горючего газа факел становится длинным, светящимся оранжевым цветом и коптящим из-за избытка частиц не окисленного углерода – сажи (рис. 2.3, б). Такое пламя называют *науглероживающим*. Пластичность металла шва в этом случае снижается из-за повышенного содержания углерода.

При сварке используется в основном нормальное пламя и только в некоторых специальных случаях – окислительное и науглероживающее. Вид

пламени устанавливается долей подачи газов с помощью вентилялей «К» (кислородного) и «Г» (горючего газа) на корпусе горелки (рис. 2.4).

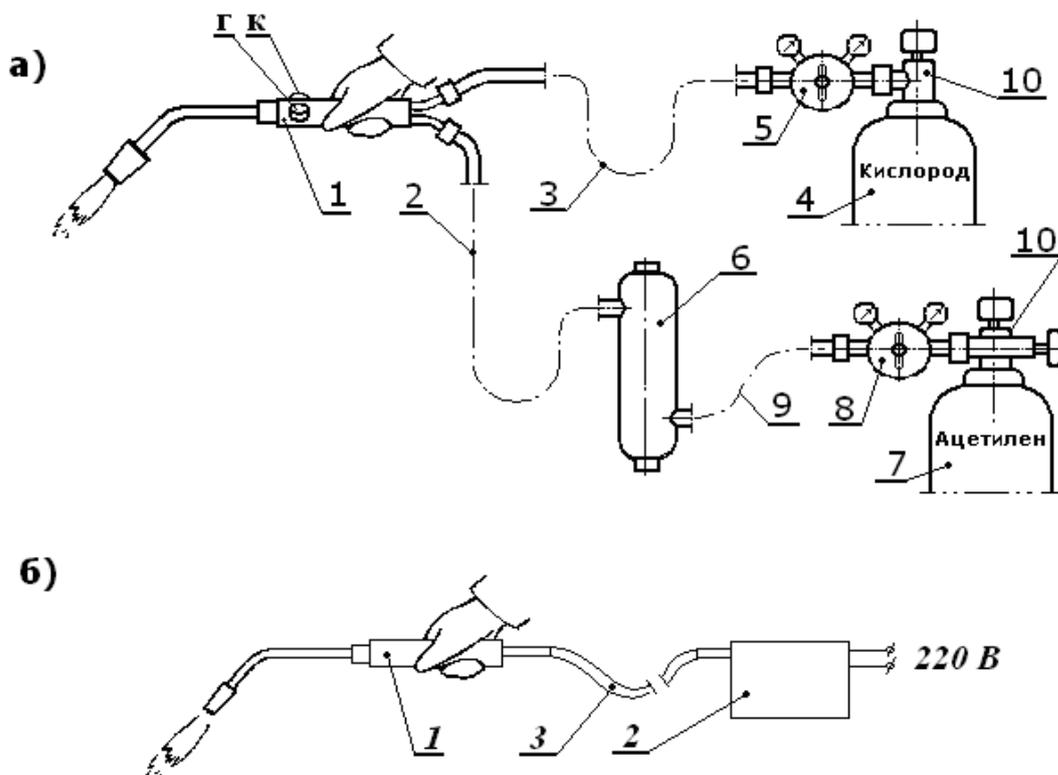


Рис. 2.4

Максимальные температуры пламени зависят от применяемого горючего (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Горючие газы	Формула	Плотность, кг/м ³	Удельная теплота в зоне горения, кДЖ/м ³	Максимальная температура пламени в смеси с кислородом, °С
Ацетилен	C ₂ H ₂	1,171	21210	3150
Водород	H ₂	0,0898	5400	2100
Природный газ	CH ₄	0,733	5670	1850
Пропан-бутан	C ₃ H ₈ +C ₄ H ₁₀	1,867	14750	2700
Пары керосина	-	ок. 0,8 жидк.	43540	2400

До 30-х годов XX века газовая сварка как промышленный способ преобладала над другими, однако совершенствовавшиеся электрические способы (дуговой и контактная) вытеснили газовую сварку из крупного промышлен-

ленного производства. Этому способствовало также вовлечение в промышленный оборот заготовок всё возрастающей толщины. В настоящее время газовая сварка используется в ручном варианте при соединении разнообразных металлических, относительно тонкостенных – до 3 мм, заготовок в сантехнических и ремонтных работах. На базе газовой сварки получили развитие другие газопламенные процессы – газокислородная резка и поверхностная термообработка.

2.2. Состав поста для газовой сварки

Комплект оборудования, используемый при выполнении сварки любым способом, принято называть сварочным постом. Состав поста может быть различным в зависимости от способа сварки, места её выполнения, степени механизации и некоторых других обстоятельств. В состав поста, как минимум, входит так называемое основное сварочное оборудование, непосредственно связанное с ведением процесса сварки. Помимо основного, в состав сварочного поста могут включаться те или иные виды вспомогательного сварочного оборудования, которое предназначено для обеспечения наиболее эффективного использования основного.

Состав поста газовой сварки варьируется в зависимости от используемого способа подачи газов, из которых образуется горючая смесь. В настоящее время преимущественно применяется отдельная подача газов с образованием горючей смеси непосредственно в сварочной горелке. Это позволяет регулировать не только мощность факела пламени, но и соотношение компонентов горючей смеси.

Для газопламенной обработки находит также применение схема с подачей в горелку готовой водородно-кислородной горючей смеси от водяного электролизёра.

На рис. 2.4, а представлен состав поста для газовой сварки с отдельной подачей газов в случае использования в качестве горючего газа ацетилена.

В него входят горелка 1, соединённая шлангами 2, 3 и 9 соответственно с ацетиленовым 7 и кислородным 4 баллонами. Между ацетиленовым баллоном и горелкой включен предохранительный затвор 6. Отбор газов из баллонов производится через кислородный 5 и ацетиленовый 8 редукторы, закреплённые на вентилях 10 соответствующих баллонов.

Вместо ацетиленового баллона может быть установлен ацетиленовый генератор, производящий ацетилен за счёт реакции между карбидом кальция (CaC_2) и водой:



Газовая горелка 1 (рис. 2.4, а) предназначена для выполнения нескольких функций:

- создавать, регулировать состав и регулировать расход горючей смеси,
- направлять факел на место сварки,
- манипулировать факелом с целью регулирования характера нагрева места сварки, регулирования скорости сварки, формирования геометрических параметров сварного соединения.

Гибкие резино-тканевые шланги 2, 3 и 9 образуют систему подачи газов от источников (баллонов) к горелке. Гибкость и длина (до 25 м) шлангов позволяет беспрепятственно манипулировать горелкой и располагать источники газов на безопасном расстоянии от открытого пламени горелки.

Баллоны 4 и 7 представляют собой ёмкости стандартных размеров объёмом до 40 л, изготовленные из стальной бесшовной трубы, снабжённые вентилями 10 для сообщения с системой подачи газов.

Редукторы (кислородный 5 и ацетиленовый 8) предназначены для регулирования и поддержания на заданном уровне давления газов в шлангах перед горелкой независимо от уровня расхода газов во время сварки. Контроль давления в шлангах и в баллонах производится по показаниям манометров, конструктивно входящих в состав редукторов.

Предохранительный затвор 6 служит для предупреждения проникновения горящего газа в баллон с горючим газом в случае так называемого «обратного удара», который может произойти при неправильном истечении горючей смеси из горелки.

На рис. 2.4, б показан состав поста газовой сварки с подачей готовой водородно-кислородной горючей смеси. В него входят горелка 1, электролизёр 2 и шланг 3.

Горелка 1 предназначена только для манипулирования факелом. Кроме того, в полый рукоятке горелки размещен пористый материал, выполняющий функции огнепреградителя.

Электролизёр 2 является генератором горючей водородно-кислородной смеси, которая возникает при электролизе воды.

2.3. Технология ручной газовой сварки

2.3.1. Параметры режима газовой сварки и их регулирование

Конфигурация и размеры сварочной ванны, которые необходимо поддерживать при газовой сварке, зависят от толщины кромок соединяемых заготовок и от принятого порядка наложения шва. Шов может быть односторонним (рис. 2.5, а), двухсторонним (рис. 2.5, б), однопроходным и многопроходным (рис. 2.5, в).

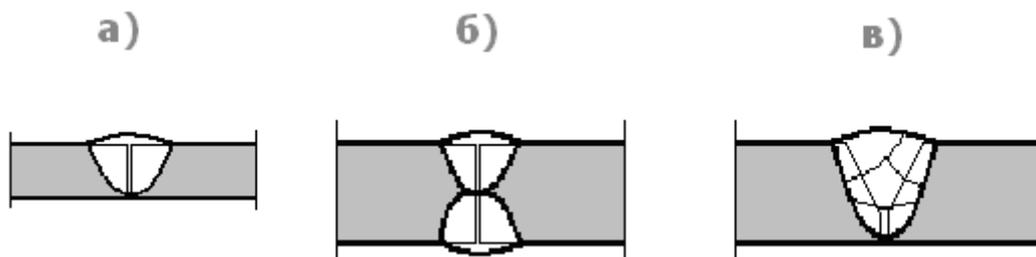


Рис. 2.5

Размеры поперечного сечения сварного шва на тонком металле при однопроходном наложении могут быть больше, чем размеры поперечного сечения шва на толстом металле при многопроходном наложении. На размеры сварочной ванны влияют также условия отвода тепла в массу заготовок.

Усиление отвода тепла при повышении коэффициента теплопроводности и удельной теплоёмкости, а также при увеличении массы заготовок приводит при всех прочих равных условиях к уменьшению размеров сварочной ванны и, в частности, её глубины (глубины проплавления). На рис. 2.6 показано, что при сварке заготовок одинаковой толщины в стыковом соединении (рис. 2.6, а) отвод тепла идёт в меньшую массу, чем в тавровом соединении (рис. 2.6, б).

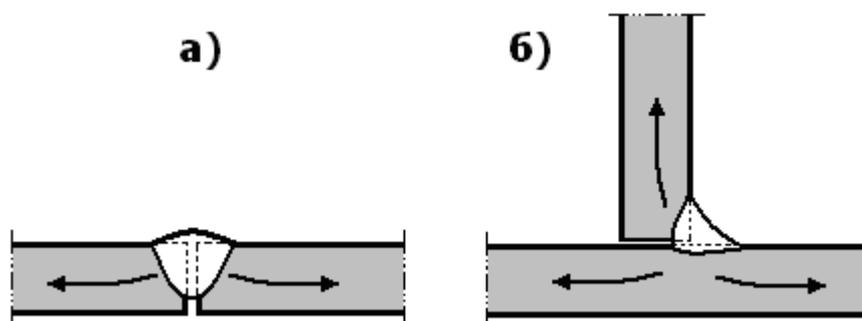


Рис. 2.6

Поскольку состояние сварочной ванны и, следовательно, свойства металла сварного шва зависят от мощности источника тепла – факела горящего

газа, то основным параметром режима газовой сварки является удельный расход горючей смеси, л/мин. Расход смеси пропорционален диаметру выходного канала наконечника горелки (номеру наконечника), давлению газовой смеси перед горелкой и степени открытия вентилей на горелке. В комплект газовой горелки входит несколько сменных наконечников с разными диаметрами каналов, что позволяет ступенчато менять расход горючей смеси. Более точную настройку в пределах ступени производят с помощью вентилей на горелке.

Давление газов перед горелкой устанавливают с таким расчётом, чтобы обеспечивался максимальный расход для используемого наконечника. Поэтому в процессе сварки регулировку этого давления с помощью редукторов производят редко.

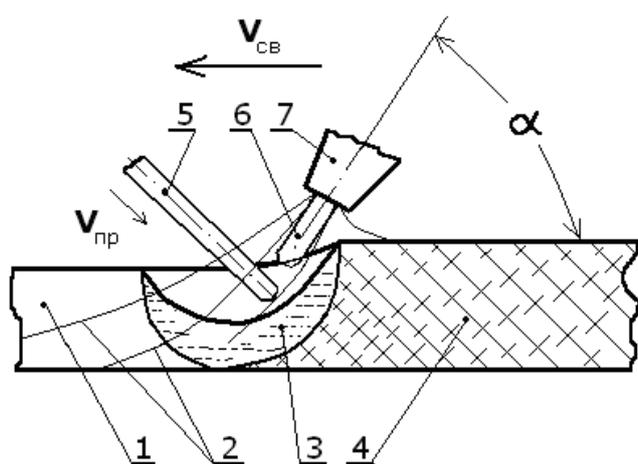


Рис. 2.7

Вторым параметром режима сварки, также влияющим на интенсивность нагрева соединяемых кромок, является угол наклона α оси наконечника горелки к плоскости заготовки (рис. 2.7, при так называемом левом способе газовой сварки). При уменьшении угла α уменьшается доля энергии факела, вводимая в соединяемые кромки заготовок. Максималь-

ная интенсивность нагрева достигается при $\alpha = 80 \dots 90^\circ$.

Удельный расход газов рассчитывают в зависимости от толщины заготовки с учётом экспериментально полученных коэффициентов, которые имеют размерность л/мм толщины. Сумма удельных расходов газов будет удельным расходом горючей смеси, и по этой величине выбирается номер наконечника горелки.

2.3.2. Типы соединений, выполняемых газовой сваркой

С применением газовой сварки можно выполнить все типы сварных соединений, которые выполняются дуговой сваркой: стыковые, нахлёсточные, угловые и торцевые (рис. 2.8 а, б, в, г). При сварке листов толщиной до 1 мм применяют также сварку по отбортовке без присадки (рис. 2.8 д, рис. 2.11).

Вместе с тем, ввиду относительно меньшей плотности мощности источника тепла, газовая сварка, как уже отмечалось, конкурентоспособна при соединении кромок толщиной до 5...6 мм. По этой же причине нежелательно

применять газовую сварку для выполнения нахлесточных соединений листов: большая ширина зоны термического влияния способствует возникновению значительных остаточных перемещений (искажений формы, коробления).

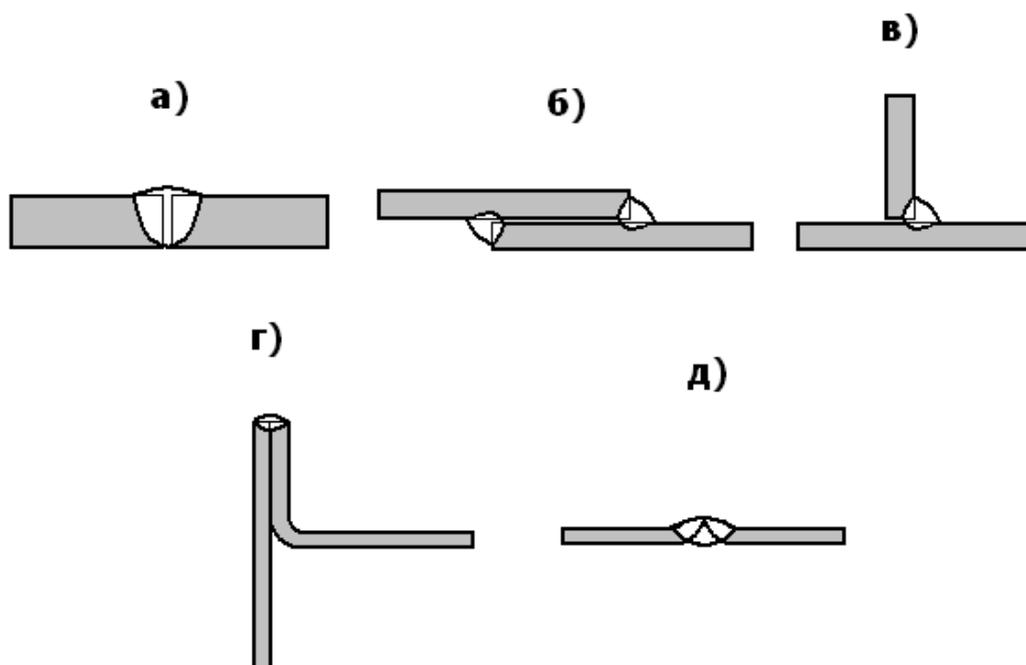


Рис. 2.8

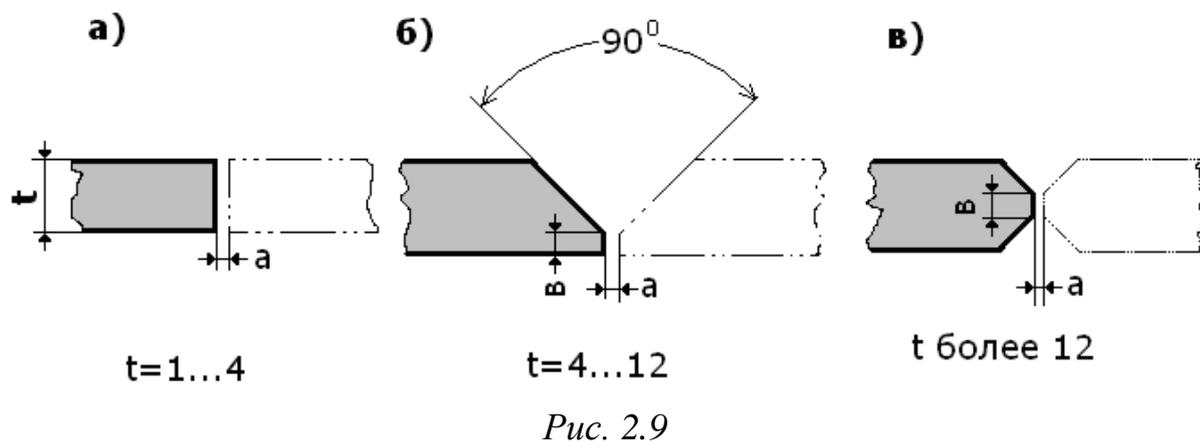
2.3.3. Подготовка заготовок к газовой сварке

Хотя в принципе газопламенным способом возможна сварка стальных заготовок толщиной до 25 мм, в настоящее время ограничиваются толщиной 5 ... 6 мм, так как при сварке листов бóльшей толщины эффективнее применение электрических способов сварки плавлением.

Подготовка заготовок перед газовой сваркой заключается в обработке и зачистке кромок. Обработка кромок состоит в придании им профиля необходимых очертаний и необходимой конфигурации в плане. Профиль кромки может быть прямоугольным или иметь односторонний или двухсторонний скос (рис. 2.9).

На рис. 2.9 показаны также конструктивные элементы обработки кромок и конструктивные элементы соединения при сборке под сварку: толщина заготовки t , сборочный зазор a , притупление кромки b , угол раскрытия кромок. При наибольшей толщине свариваемых кромок 6 мм технически нет необходимости производить скос кромки. Вместе с тем, при прямоугольных кромках для полного проплавления толщины 5...6 мм потребуется такая мощность и размеры пламени, что при относительно малой сосредоточенности нагрева до температуры свыше 300 °С окажется нагретой чрезмерно

большая зона металла около сварного шва. Это приведёт к возникновению значительных остаточных искажений формы сваренного изделия.



2.3.4. Техника газовой сварки

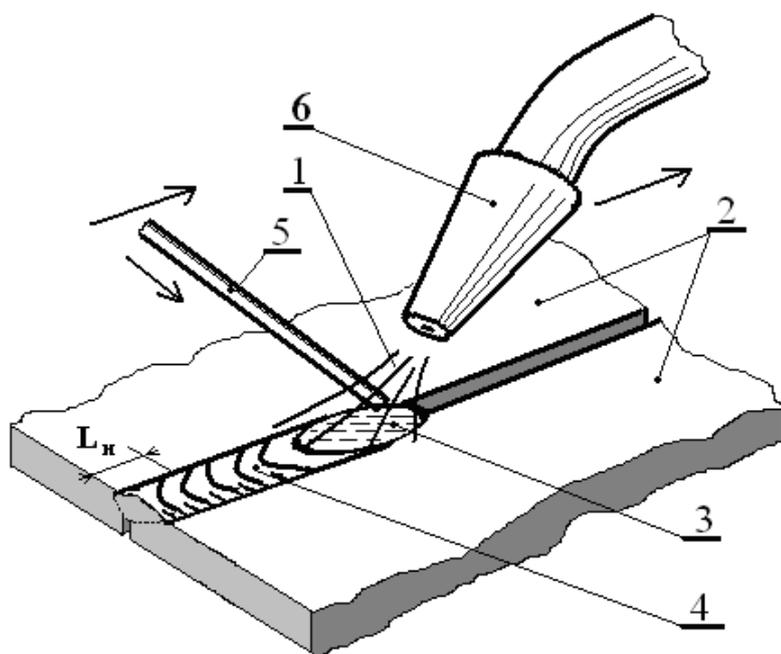


Рис. 2.10

Перед началом работы открывают вентиль «Г» (рис. 2.4) и спичкой или зажигалкой поджигают истекающий из наконечника 6 горелки горючий газ (рис. 2.10).

Сгорая за счёт кислорода воздуха, газ даёт красноватое коптящее пламя. Открыв вентилем «К» подачу кислорода, постепенно её увеличивают и устанавливают необходимый вид пламени, чаще всего, нормальное.

Затем направляют факел на сближенные кромки заготовок в том месте, где предполагается начать наложение сварного шва. Длина этого первоначально участка должна быть равна длине будущей сварочной ванны (примерно 10 мм). Доведя этот участок до расплавленного состояния с необходимой глубиной проплавления, начинают перемещать факел вдоль соединяемых кромок, перемещая этим образовавшуюся сварочную ванну 3. Одновременно другой рукой подают в зону сварки присадочную проволоку 5.

Как показано на рис. 2.7, ядро 6 газового факела 2 удерживается примерно на одинаковом расстоянии около 3мм как от поверхности сварочной ванны 3, так и от конца присадочной проволоки 5. По мере наращивания сварного шва 4 мундштук 7 горелки перемещается со скоростью $V_{св}$ по контуру соединяемых кромок. Присадочная проволока по мере оплавления подается с некоторой скоростью $V_{пр}$, обеспечивающей примерно постоянное положение её плавящегося конца. Кроме того, независимыми движениями присадочной проволоки можно регулировать распределение температуры и влиять на формирование сварного шва («перемешивать» металл сварочной ванны).

Таким образом, состав металла сварочной ванны формируется как за счёт оплавленных кромок заготовок основного металла, так и за счёт оплавления присадки. По мере передвижения горелки и факела происходит оплавление кромок основного металла в головной части сварочной ванны и кристаллизация расплавленного металла сварочной ванны в её хвостовой части, что означает формирование металла сварного шва.

При газовой сварке металла толщиной до 1мм вместо применения присадочного материала производят так называемую отбортовку кромок и за счёт оплавления отогнутых кромок (рис. 2.11, а) формируют массу сварного шва (рис. 2.11, б).

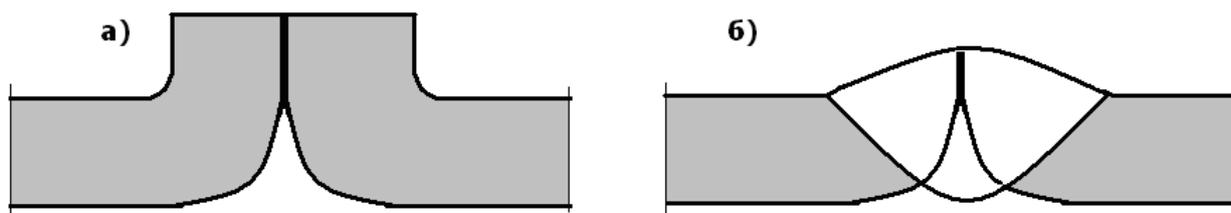


Рис. 2.11

2.3.5. Оборудование для газовой сварки

Оборудование для газовой сварки рассмотрим в той же последовательности, в которой оно изображено на рисунке 2.4.

Газовая горелка

Конструкцию горелки составляют (рис. 2.12): корпус-рукоятка 1, отъёмный ствол 8, сменный наконечник 9.

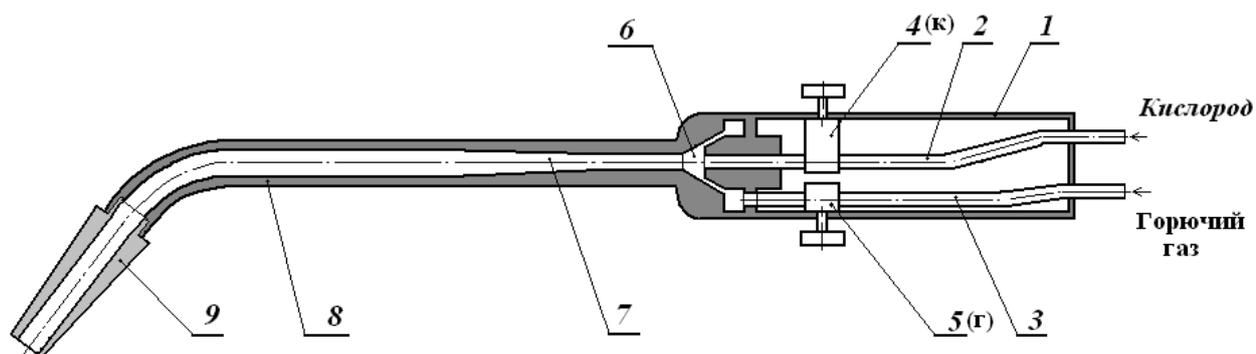


Рис. 2.12

Внешняя форма и размеры рукоятки 1 выбраны по эргономическим соображениям. Внутри рукоятки размещаются трубки 2 и 3 для подачи газов, вентили 4 (к) и 5(г) для регулирования расхода соответственно кислорода и горючего газа, инжекторная камера 6, обеспечивающая подсос горючего газа потоком кислорода. На входе в корпус газоподводящие трубки 2 и 3 имеют резьбовые оконцовки, на которые наворачиваются накидные гайки ниппелей резиноканевых шлангов 2 и 3 (рис. 2.4).

Ствол 8 присоединяется к рукоятке 1 накидной гайкой, и его канал соосен выходному каналу инжекторной камеры 6. Расширенная часть канала ствола выполняет функцию смесителя газов. На выходе ствола вворачивается на резьбе один из наконечников из комплекта наконечников с разными по диаметру каналами, что используется для ступенчатого регулирования мощности факела. Встречаются горелки с неотъёмными наконечниками. Такие горелки комплектуются набором стволов.

Предохранительный затвор

Между горелкой и баллоном с горючим газом или ацетиленовым генератором в расщелке шланга 2 (рис. 2.4) располагают предохранительный затвор 6 (рис. 2.4) или огнепреградитель. Его назначение – предотвратить проникновение пламени в газовый баллон или ацетиленовый генератор, что привело бы к взрыву с тяжёлыми последствиями. Упомянутое «неправильное» движение пламени называют обратным ударом. Это явление может возникнуть при чрезмерном засорении выходного канала наконечника или при ненормально низком давлении горючего газа. В такой ситуации пламя проникает внутрь горелки, а так как давление кислорода преодолевает давление газа, то пламя движется навстречу потоку газа.

Рассмотрим устройство и действие водяного предохранительного затвора для рабочего давления до 0,07 МПа (рис. 2.13).

В корпус 1 герметично вварены подводящий штуцер 3, отводящий штуцер 8, корпус предохранительного клапана 6, контрольный вентиль 5. В нижний конец штуцера 2 ввёрнута спускная пробка 4, а на верхнем конце штуцера закреплён обратный шариковый клапан 3. В корпус затвора заливается вода до уровня вентилей 5. При нормальной работе

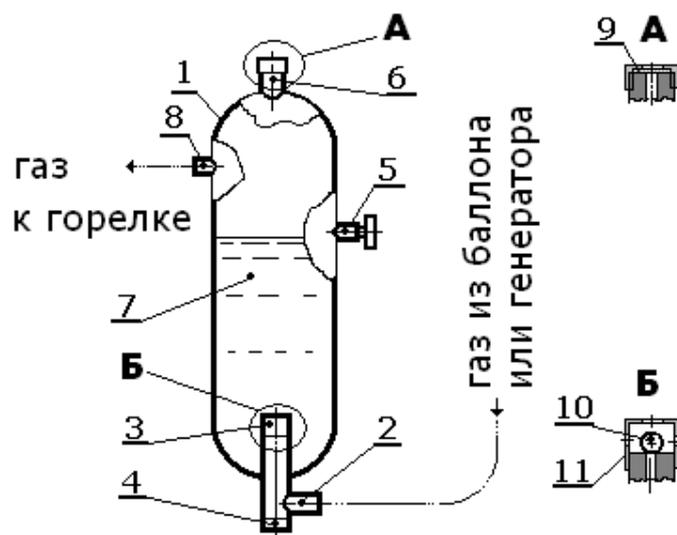


Рис. 2.13

горючий газ, преодолевая своим давлением вес шарика 10 (см. врезку Б), пробулькивает (барботирует) через слой воды и уходит через штуцер 8.

В случае обратного удара горящий газ под повышенным давлением кислорода попадает через штуцер 8 в пространство над слоем воды. Под давлением, во-первых, шарик 10 перекрывает доступ газа в корпус затвора, во-вторых, разрывается фольговая мембрана 9 (см. врезку А) под накидной гайкой предохранительного клапана 6, и продукты горения газа выбрасываются в атмосферу.

Огнепреградитель отличается тем, что не содержит в корпусе воды. Находят применение различные по конструкции затворы и огнепреградители в зависимости от диапазона рабочего давления газа.

Газовые баллоны

В качестве источников кислорода и горючего газа в составе сварочного поста обычно используются стальные баллоны. Для увеличения ёмкости газы в баллонах содержатся в сжатом или сжиженном состоянии. Кислород и водород содержатся в сжатом состоянии, ацетилен – одновременно в растворённом и сжатом состоянии, пропан, бутан и пропанбутановые смеси – в сжиженном состоянии.

Кислородные и ацетиленовые баллоны выполнены из стальной углеродистой или низколегированной бесшовной трубы (рис. 2.14). С одной стороны на баллоне сформирована горловина 2 с конической резьбой для закрепления газоразборного вентиля 6, на горловину напрессована обойма 4 с наружной резьбой для наворачивания защитного колпака 5. Защитный колпак предохраняет вентиль от повреждений при транспортировке. Перед началом сварочных работ его снимают.

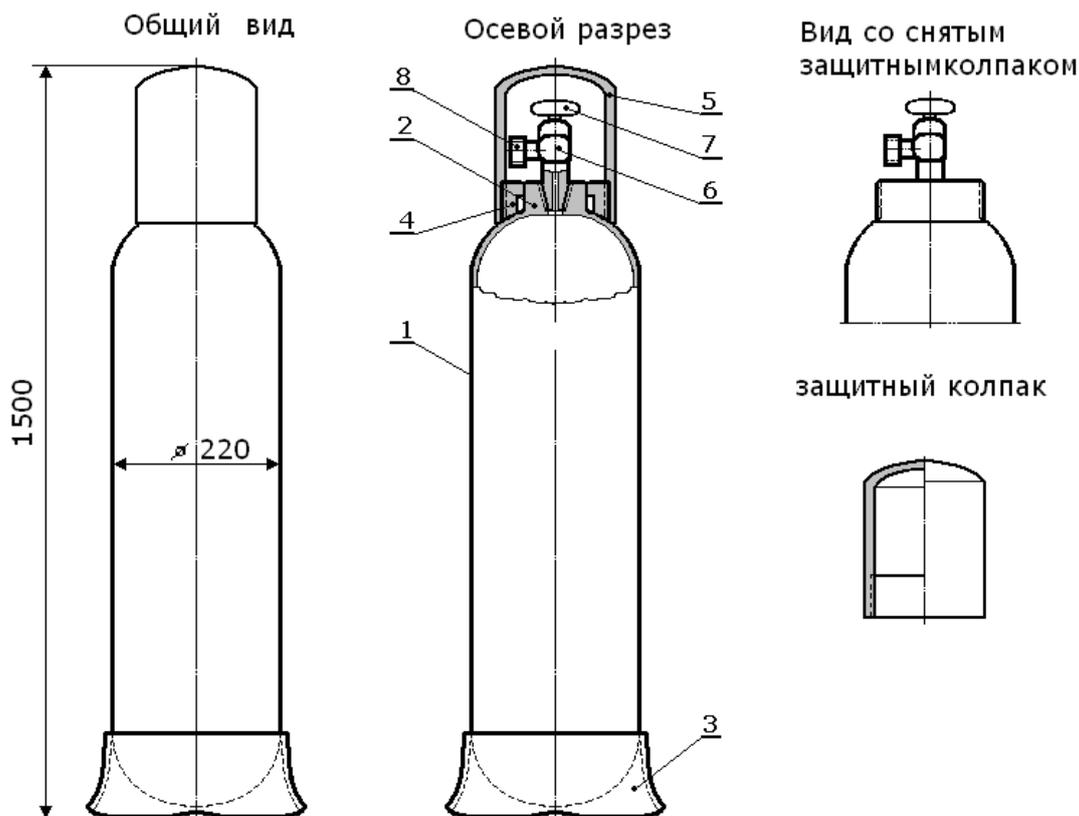


Рис. 2.14

С другой стороны на баллоне сформировано сферическое днище, а с наружной стороны напрессован опорный башмак 3, что позволяет устанавливать баллон в вертикальном положении. На резьбовой штуцер 8 с помощью накидной гайки закрепляется газовый редуктор (см. далее). Маховичком 7 открывается выход газа из баллона.

Газы с низкой температурой сжижения (кислород, сжатый воздух, водород и др.) закачиваются в баллоны под давлением 15 МПа. Газы с высокой температурой сжижения (пропан и бутан) хранятся в баллонах в сжиженном состоянии при давлении 1,6 МПа. Ацетилен хранится в баллоне при давлении 1,9 МПа в виде раствора в ацетоне, который, в свою очередь, заполняет поры гранулированного активированного угля. Такой способ хранения ацетилена применяется ввиду его склонности к взрывообразному разложению при повышении давления в газообразном состоянии.

В сварочном производстве для сжатых газов используются главным образом стандартные баллоны с внутренним объёмом 40 л. Для сжиженных газов стандартом предусмотрены баллоны с внутренним объёмом 50 л диаметром 300 мм и высотой 960 мм. Стандартизованы также окраска баллона и цвет надписи на баллоне в зависимости от вида газа (таблица 2.2).

Таблица 2.2

Название газа	Агрегатн. состояние	Давление в баллоне, МПа	Цвет окраски баллона	Цвет надписи на баллоне	Плотность /относительная плотность (по воздуху)
Азот	Газ	15	Чёрный	Жёлтый	1,250/ 0,969
Аргон чистый	Газ	15	Серый	Зелёный	1,784/ 1,383
Ацетилен	Газ в растворе	1,9	Белый	Красный	1,09/ 0,845
Пропан-Бутан	Сжиженный	1,6	Красный	Белый	2,02 /1566
Водород	Газ	1,5	Тёмно-зелён.	Красный	0.090/ 0,0697
Воздух	Газ	15	Чёрный	Белый	1.290 / 1
Гелий	Газ	15	Коричневый	Белый	0.179/ 3,021
Кислород	Газ	15	Голубой	Черный	1,43 /1,108
Углекислый газ	Газ	6	Чёрный	Жёлтый	1.980 / 1535
МАФ метилацетилен-алленовой фракции (МАФ)	Сжиженный				1,7/1,32

Газовые редукторы

Как уже отмечалось, к выходным штуцерам вентиля баллонов присоединены газовые редукторы (соответственно кислородный и ацетиленовый). Редуктор предназначен, во-первых, для понижения давления отбираемого газа в сравнении с давлением в баллоне и, во-вторых, для поддержания установленного давления независимо от расхода.

Конструктивно редукторы для разных газов отличаются, но принцип их действия одинаков. На рис. 2.15 представлена конструктивная схема газового редуктора.

Редуктор присоединяется к штуцеру запорного вентиля баллона. При открытии вентиля газ поступает в камеру 8. При вращении нажимного винта 2 в направлении движения часовой стрелки он будет ввертываться в крышку корпуса 1 и сжимать пружину 3. Пружина 3 выгибает мембрану 4, передвигая тем самым диск 5 со штоком, и открывает клапан 9. Газ из камеры 8 попадает в камеру 12 рабочего пониженного давления. После открытия соответствующего вентиля на горелке газ из рабочей камеры поступает по шлангу к горелке или резаку.

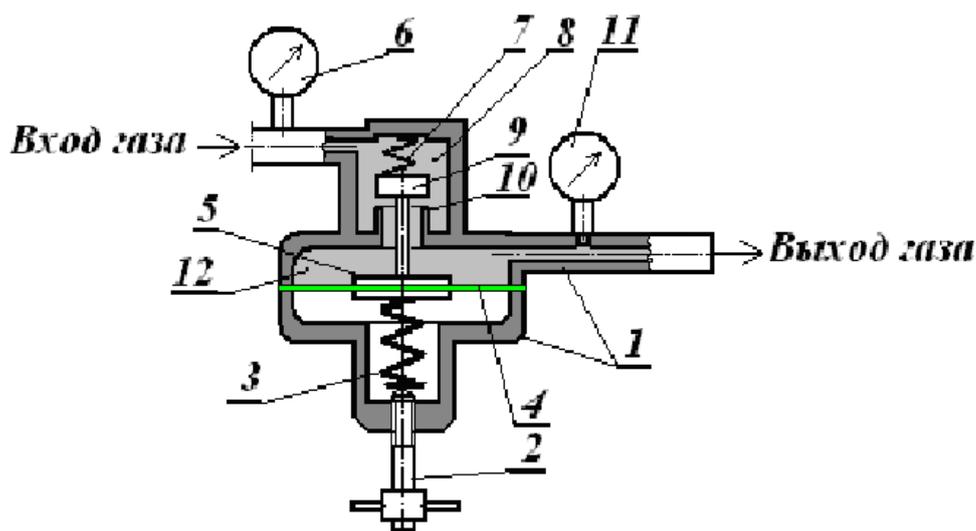


Рис. 2.15

При уменьшении или прекращении расхода газа в горелке или резаке, газ, поступающий в рабочую камеру 12 из камеры 8, нажимая на мембрану 4, преодолевает с помощью пружины 7 действие пружины 3, клапан 9 опустится на седло 10 и перекроет подачу газа из баллона. Как только расход газа возобновится или увеличится, давление газа в рабочей камере упадёт, пружина 3 вновь поднимет клапан 9, открывая подачу газа из баллона.

Практически при стабильном режиме работы горелки или резака устанавливается равновесие между действиями на мембрану 4 давления газа в рабочей камере и пружины 3, что выражается в поддержании некоторого зазора между клапаном 9 и его седлом 10.

Давление в баллоне показывает манометр 6, давление в шланге – манометр 11.

Ацетиленовые генераторы

В тех случаях, когда отсутствует или затруднена возможность доставки ацетилена в баллонах, его получают в специальных химических аппаратах – ацетиленовых генераторах. Суть химической реакции, поддерживаемой в генераторе, состоит во взаимодействии карбида кальция с водой:



Конструктивно и по порядку взаимодействия реагентов ацетиленовые генераторы разнообразны. Рассмотрим конструктивную схему и действие одного из ацетиленовых генераторов рассмотрим (рис. 2.16).

Генератор действует следующим образом. В шахту 6, закрытую крышкой 7, вставляют корзину 5, наполненную кусками карбида кальция. Затем газообразователь 4 наполняют водой. В водосборник 1 также наливают воду с частичным его заполнением. При этом водой заполняется и циркуляционная труба 3. Как только вода соприкоснется с карбидом кальция, начинается выделение газа, который скапливается в верхней части газосборника 4. Давлением газа часть воды из газообразователя по циркуляционной трубе 3 переливается в водосборник 1. Если газоотборочный вентиль 2 закрыт, уровень воды под давлением газа в газосборнике 4 понижается настолько, что контакт воды с карбидом кальция прекращается, прекращается и газообразование. С началом газосварочных работ, когда вентиль 2 открыт и начинается отбор газа, уровень воды в газообразователе повышается, возникает контакт воды с карбидом кальция и газообразование возобновляется. Таким образом, степень контакта воды с карбидом кальция и, следовательно, производительность генератора зависят от того, при каком отборе газа устанавливается равенство между гидростатическим давлением воды и давлением газа.

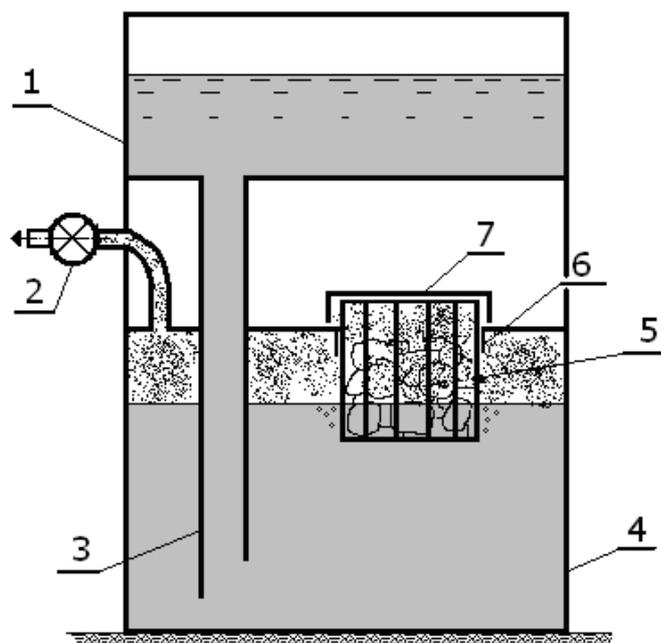


Рис. 2.16

Следует заметить, что всегда предпочтительнее питание сварочного поста ацетиленом от баллона, нежели от генератора, так как газ в баллоне чище. Кроме того, при эксплуатации генератора возникают отходы в виде так называемого ила (низкокачественной гашёной извести) и требуются усиленные меры по безопасности.

Электролизёр

На рис. 2.17 показана развёрнутая схема электролизёра. В общем корпусе, обозначенном пунктиром, размещаются блок электрического питания 1 со схемой регулирования мощности (производительности) и пультом управления, собственно электролизёр 2, осушитель газовой смеси 3, жидкостный затвор 4 и вентилятор 6. Горелка и шланг обозначены соответственно позициями 5 и 7.

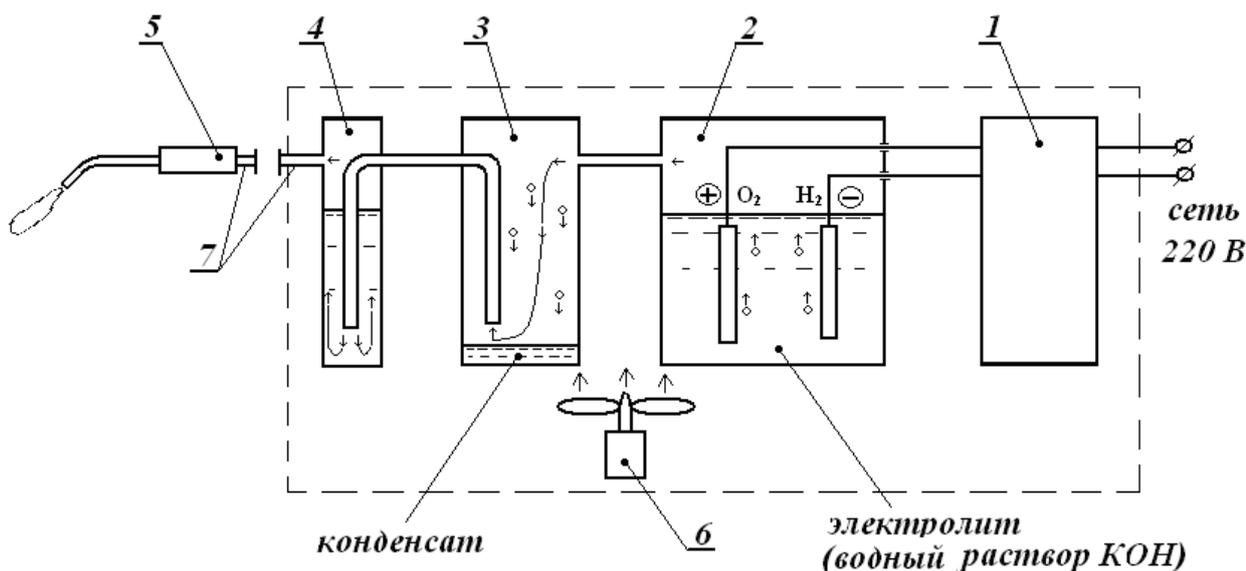


Рис. 2.17

Регулирование мощности факела производится регулированием величины тока на выходе блока питания 1, так как пропорционально изменению тока изменяется производительность электролизёра.

3. ГАЗОПЛАМЕННАЯ ПАЙКА

3.1. Сущность процесса газопламенной пайки

Процесс пайки металлов заключается в соединении паяемых заготовок промежуточным слоем расплавленного более легкоплавкого металла или сплава (припоя) за счёт смачивания и последующего затвердевания. Прочность паяного соединения определяется механическими свойствами припоя, размерами площадки соприкосновения заготовок, занятой припоем, и толщиной слоя припоя. Более тонкий слой припоя при всех прочих равных условиях обеспечивает бóльшую прочность.

Важным условием получения прочного паяного соединения является нагрев паяемых поверхностей до температуры, на 2...5% выше температуры плавления припоя и хорошая взаимная смачиваемость припоя и паяемого металла (смачиваемость тем лучше, чем меньше краевой угол смачивания θ , рис. 3.1).

Находят применение несколько способов пайки, которые отличаются, главным образом, температурой плавления припоя и, следовательно, средствами нагрева.

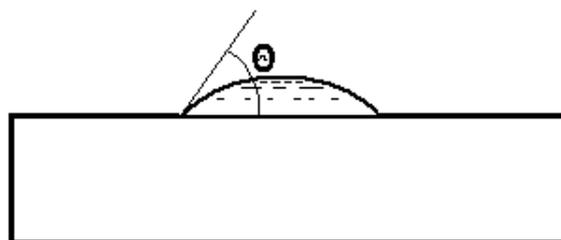


Рис. 3.1

Оборудование газосварочного поста может быть применено при пайке сталей так называемыми твёрдыми припоями с температурой плавления свыше 600°C . При этом могут выполняться стыковые и нахлесточные соединения (рис. 3.2, а, б).

На рис. 3.3 показана последовательность пайки нахлесточного соединения. Вначале (рис. 3.3, а) вдоль кромки верхней детали укладывают пруток припоя и покрывают сверху слоем порошкообразного флюса. Затем факелом горелки прогревают верхнюю и нижнюю детали до температуры плавления припоя и флюса. Расплавленный флюс, затекая в зазор между деталями, очищает их поверхности от оксидов, а расплавленный припой смачивает очищенные поверхности. Таким образом, к моменту прекращения нагрева (рис. 3.3, б) зазор заполнен расплавленным припоем, который при остывании деталей затвердевает. Чем тоньше слой припоя между заготовками, тем прочнее, как уже отмечалось, соединение, поэтому детали перед сваркой желательно тщательно подогнать.

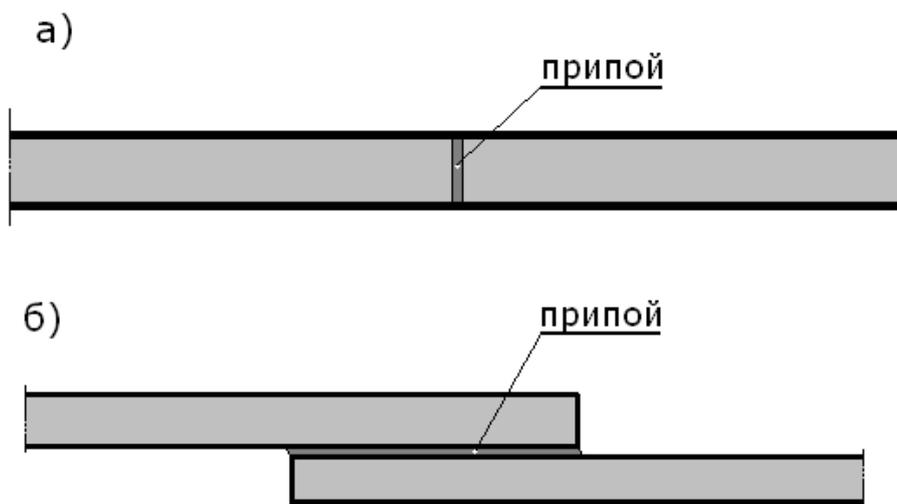


Рис. 3.2

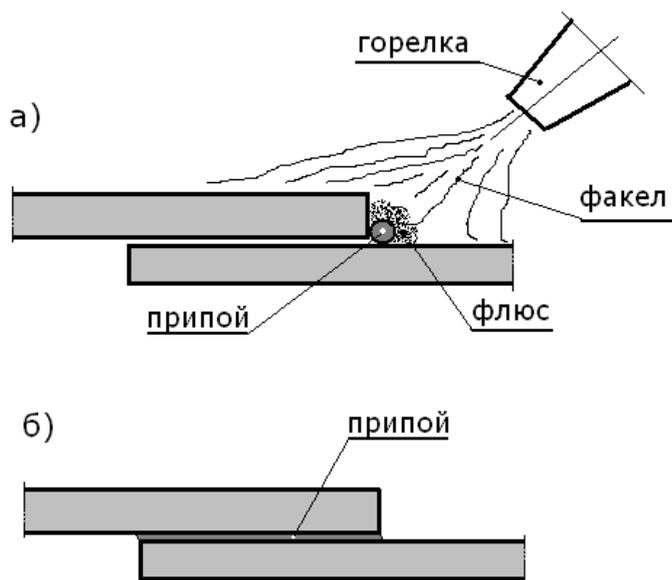


Рис. 3.3

Характерной особенностью пайки является возможность одновременного соединения многих деталей, если в качестве средства нагрева применяется камерная печь. Для этого детали изделия с помощью дополнительных временных креплений или с помощью специальной штатной оснастки соединяют между собой (операция «сборка перед пайкой»), закладывают в места сопряжения деталей припой

в виде отрезков проволоки или фольги и помещают в камеру нагретой печи. Выдержка в печи производится до достижения всем изделием температуры плавления припоя. После этого изделие вынимают из печи и охлаждают на воздухе до момента затвердевания припоя.

4. ДРУГИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗОПЛАМЕННОГО НАГРЕВА

Газопламенный нагрев применяют для нагрева поверхности деталей для поверхностной закалки, для предварительного или сопутствующего подогрева деталей во время дуговой сварки чугуна и сталей, склонных к закалке на воздухе, при сварке металла большой толщины, для местного нагрева при тепловой правке деталей после дуговой сварки.

4.1. Газокислородная и керосинокислородная резка сталей

4.1.1. Сущность и процесс кислородной резки металлов

К числу газопламенных способов обработки металлов относятся тепловые способы резки: газокислородная и керосинокислородная (далее, кислородная резка). Эти способы резки основаны на сквозном прожигании по заданной траектории узкой полосы металла в струе чистого кислорода. Устойчивый самоподдерживающийся процесс горения металла в среде чистого ки-

слорода возможен только после предварительного подогрева металла до определённой температуры – температуры горения $T_{гор}$, которая для углеродистых сталей равна примерно 1200 °С. Обязательным условием получения чёткой кромки реза является неравенство:

$$T_{гор} < T_{плав},$$

в котором $T_{плав}$ – температура плавления металла. Этому условию удовлетворяют углеродистые и низколегированные стали и не удовлетворяют чугун и цветные металлы.

В связи с отмеченным устройства для тепловой резки – газокислородный и керосинокислородный резаки – содержат в своём составе газокислородную или керосинокислородную горелку и независимо управляемую магистраль подачи чистого кислорода (режущего кислорода). В первом случае в горелке сжигается смесь горючего газа и кислорода, во втором – смесь паров керосина с кислородом.

Для начала кислородной резки поверхность заготовки нагревают на небольшом участке («пяточке») подогревающим пламенем до температуры горения металла (для стали – около 1200 °С). Затем в центр пятна нагрева направляется струя режущего кислорода. Начинается горение (высокотемпературное окисление) компонентов металла, которое сопровождается дальнейшим повышением температуры в месте реза, вплоть до температуры плавления (рис. 4.1).

По мере выброса с места реза оксидов и частиц расплавленного металла углубление под резаком увеличивается и вскоре достигается сквозное прожигание. С этого момента резаку придаётся поступательное перемещение по намеченной траектории реза. Скорость перемещения выбирается такой, чтобы перед резаком металл успевал нагреваться до температуры горения.

На разных этапах процесса кислородной резки резак работает либо в режиме подогревающей горелки, либо в режиме резака. В первом случае сжигается газокислородная смесь или смесь паров керосина с кислородом, истекающая из головки резака, образуя факел пламени. Во втором случае в центральную трубку головки подаётся чистый кислород, а мощность подогревающего факела уменьшается до минимума.

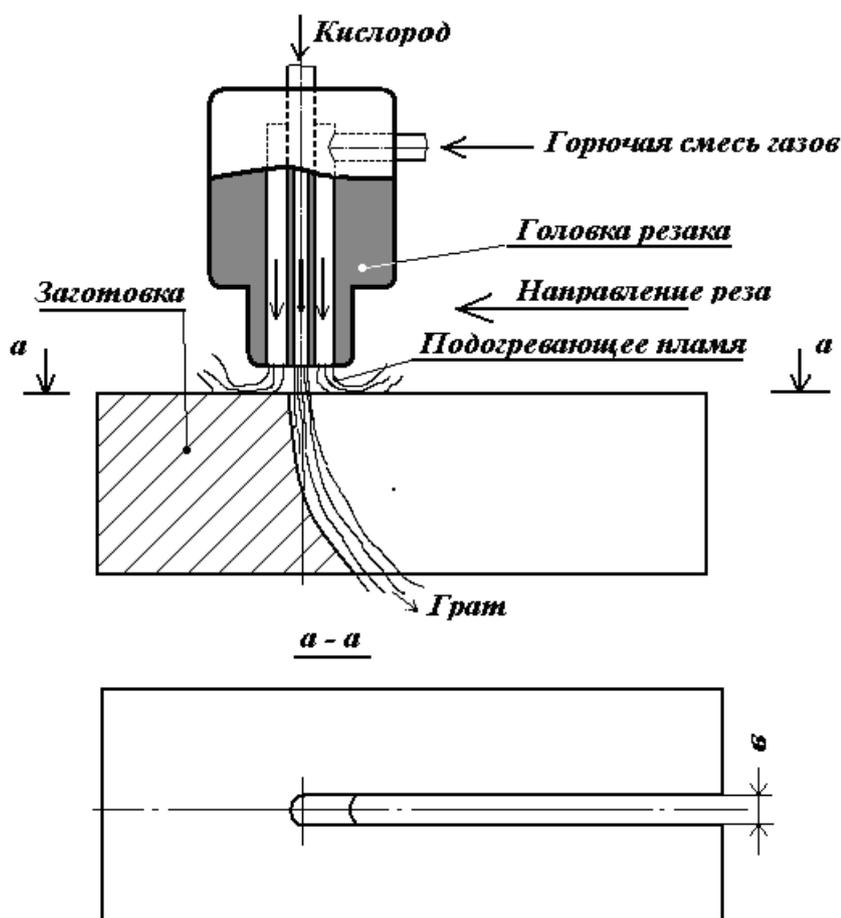


Рис. 4.1

Тепловая мощность горелки и резака выбираются в зависимости от вида обрабатываемого материала и его толщины и регулируется расходом газов.

При использовании вместо горючего газа паров керосина давлением воздуха в бачке 5 (рис. 4.2, б) керосин подаётся в горелку, содержащую специальную испарительную камеру.

4.1.2. Состав поста для кислородной резки (КР)

В состав поста для газокислородной ручной резки входят (рис. 4.2, а): резак 1, шланги для подачи газов 2, кислородный баллон 3, контрольно-регулирующая аппаратура 4 и 5, огнепреградитель (не показан), баллон с горючим газом 7.

В состав поста для керосинокислородной ручной резки входят (рис. 4.2, б): керосинорез 1, шланги для подачи газов и керосина 2, кислородный баллон 3 с редуктором 4, огнепреградитель (не показан), герметичный бачёк 5 для хранения керосина с ручным воздушным насосом 6 и манометром 7.

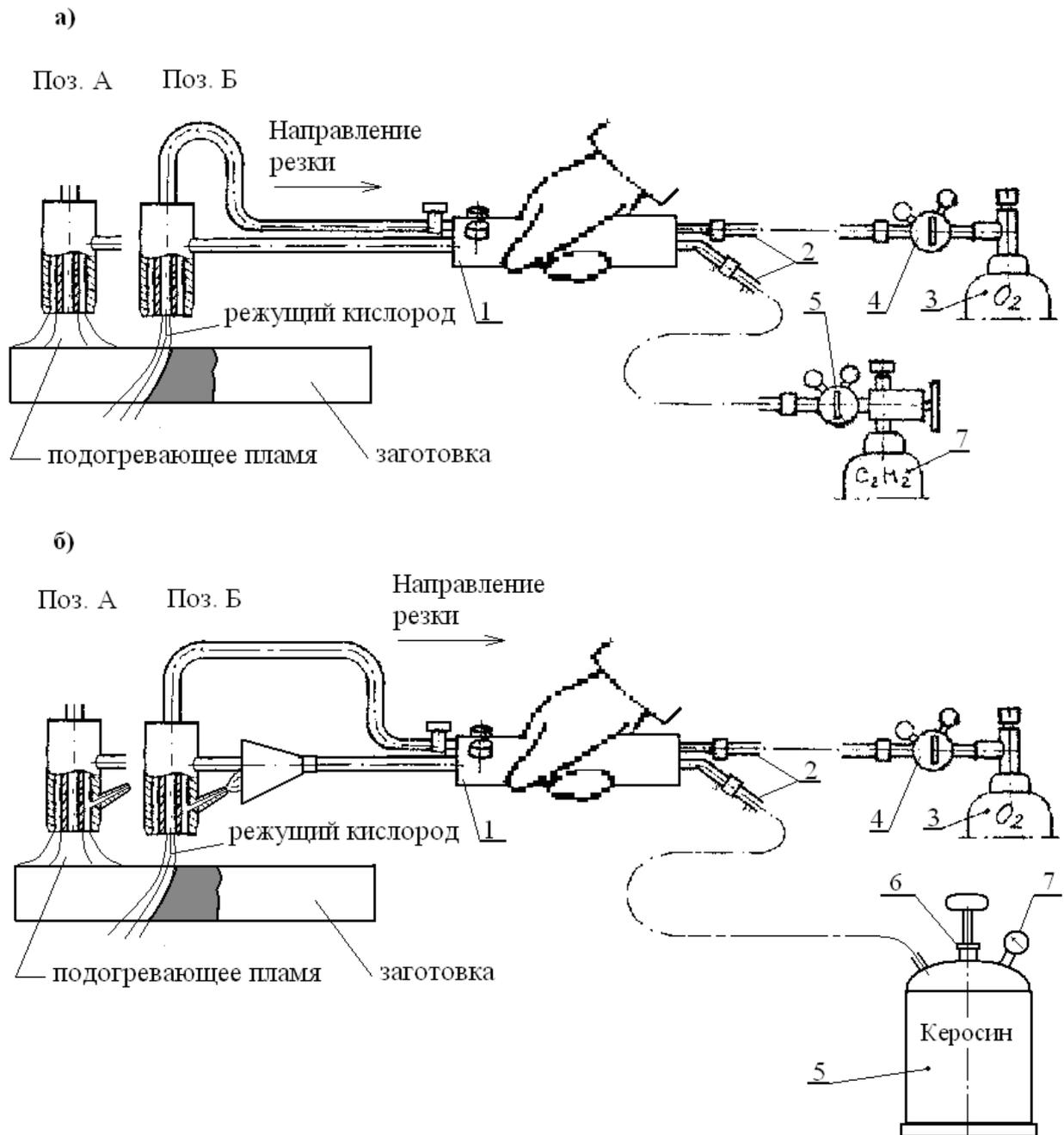


Рис. 4.2

Контрольные вопросы

1. Какие способы обработки материалов относятся к газопламенным?
2. В чём заключается принцип газовой сварки?
3. Перечислить относительные достоинства и недостатки способов газопламенной обработки с отдельной подачей газов и с подачей готовой горючей смеси.
4. Каким способом обеспечивается необходимый химический состав металла сварного шва при газопламенной сварке?

5. На каком принципе основано действие газовых редукторов?
6. Как регулируется режим обработки при использовании электролизной установки?

Рекомендуемая литература

1. Черкасов, В.К. Дуговые способы сварки металлов: учебное пособие / В.К. Черкасов.- Вологда: ВоГТУ, 2007.- 47 с.
2. Евсеев, Г.Б. Оборудование и технология газопламенной обработки металлов и неметаллических материалов: учебник для студентов вузов / Г.Б. Евсеев, Д.Л. Глизманенко. – М.: Машиностроение, 1974.
3. Некрасов, Ю.И. Газы – заменители ацетилена / Ю.И. Некрасов.- М.: Машиностроение, 1974.

5. ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ СВАРКА

5.1. Сущность и процесс электрошлаковой сварки (ЭШС)

Электрошлаковым этот способ сварки называется потому, что в качестве источника тепла используется специально приготовленный объём шлака 1 (рис. 5.1) – флюс, расплавленный электрическим током .

В отличие от дуговых способов при ЭШС чётко выделяются два расплава – шлаковый (шлаковая ванна 1) и металлический (металлическая ванна 2).

Особенности ведения ЭШС:

- свариваемые заготовки 3 с прямоугольным профилем кромок устанавливаются вертикально с зазором 30...50 мм,
- сварка металла любой толщины производится за один проход,
- шлаковая ванна выполняет не только роль источника тепла, но и средства защиты металлической ванны от вредного влияния атмосферы.

Как видно из схемы, расплав металла и шлака удерживается от вытекания с двух сторон кромок свариваемых заготовок 3, с двух других сторон – специальными подвижными ползунами 4, а снизу – ранее сформированным металлом шва 5.

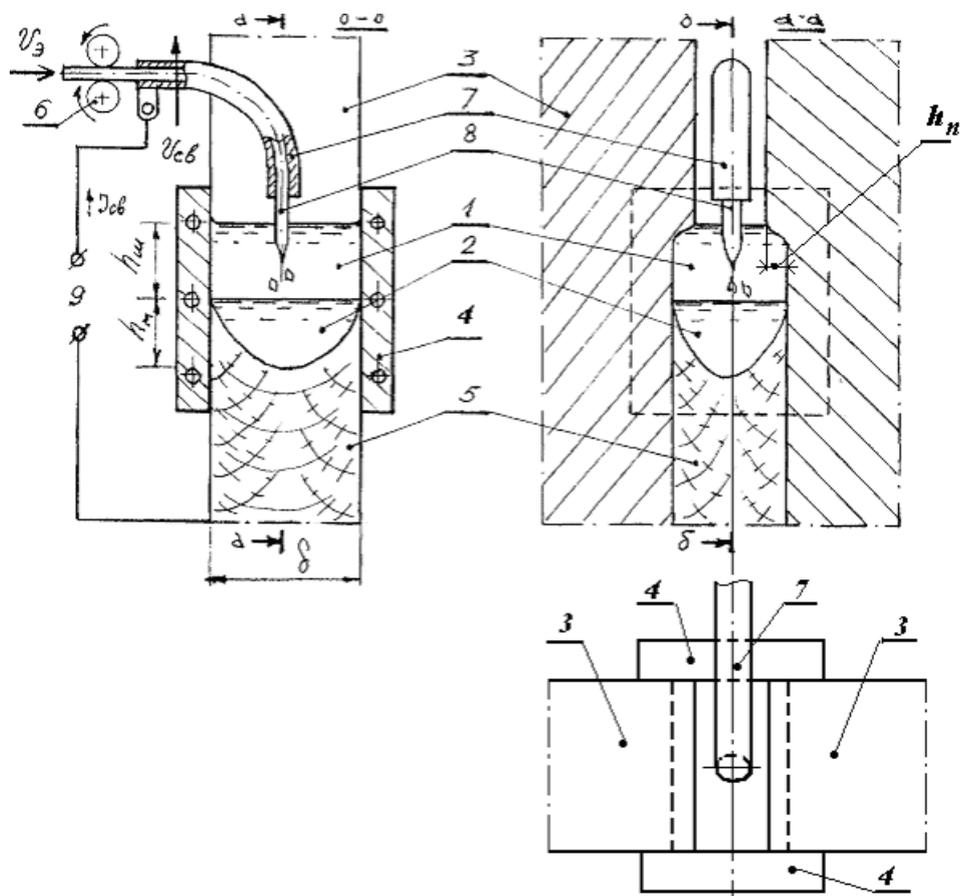


Рис. 5.1. Схема процесса электрошлаковой сварки

Через открытую верхнюю поверхность сварочной ванны в зону сварки роликами 6 через мундштук 7 подаётся электродная проволока 8. Проходя через слой расплавленного перегретого шлака, электродная проволока плавится и капли её металла оседают в металлическую ванну 2. Туда же стекает металл с оплавляемых кромок заготовок. Глубина оплавления кромок обозначена $h_{п}$. Рабочая температура шлаковой ванны поддерживается протекающим через неё сварочным током $I_{св}$, так как через мундштук 7 электродная проволока 8 и свариваемые заготовки присоединяются к источнику тока 9.

По мере плавления подаваемой сварочной проволоки уровень металлической ванны, а вместе с ним и уровень шлаковой ванны перемещаются вверх. Тепло металлической ванны, в основном отводится в массу заготовок, а часть тепла отводится охлаждающей водой через ползуны 4. Схема отвода тепла определяет форму дна металлической ванны – это, по существу, изотермическая поверхность температуры начала кристаллизации. Скорость вертикального перемещения сварочной ванны есть скорость сварки $V_{св}$.

Ползуны 4 и мундштук 7 – детали сварочного автомата, поднимаются вверх со скоростью сварки. Таким образом, согласованность движения пол-

зунов и мундштука со скоростью подъёма сварочной ванны обеспечивает надёжное удержание расплава.

Процесс ЭШС требует, чтобы вся поверхность шлаковой ванны поддерживалась в расплавленном состоянии. Чтобы выполнить это условие, при сварке металла толщиной более 100 мм в зазор между деталями вводят несколько мундштуков, либо мундштуку специальным механизмом придают колебания в направлении толщины металла. При сварке металла толщиной более 200 мм используют оба этих приёма.

Разработка ЭШС в институте электросварки им. Е.О.Патона в 50-х годах прошлого столетия позволила решить проблему выпуска крупнотоннажной аппаратуры для химической и нефтехимической промышленности и снять трудности обработки крупных поковок.

В настоящее время на основе ЭШС разработана технология электрошлакового переплава (ЭШП) металла на металлургических предприятиях, ЭШ-литья, ЭШ-наплавки. Сталь, подвергнутая ЭШП, оставаясь прежней по марке, чище в отношении вредных примесей, приобретает повышенные механические и эксплуатационные свойства, в частности повышенную хладостойкость,

5.2. Состав поста электрошлаковой сварки

В типовой состав поста ЭШ-сварки заготовок с прямолинейными кромками (рис. 5.2) в качестве основного сварочного оборудования входят сварочный автомат 1 с направляющей колонной 2, кассета (или кассеты) 3 для сварочной проволоки, шкаф управления 4 и источник тока 5 в виде специального однофазного или, чаще, трёхфазного сварочного трансформатора. Кроме того, в состав поста входит не показанная на схеме система циркуляции охлаждающей воды. На рис. 5.2 отмечены также ползуны 6, являющиеся конструктивными элементами (детальными) автомата, сварочная проволока 7 и кабель 8, соединяющий источник тока 5 с мундштуком.

В зависимости от формы, взаимного положения и габаритов свариваемых заготовок пост для ЭШ-сварки комплектуется автоматами различных конструкций [1]. Конструктивные отличия диктуются, прежде всего, количеством и формой присадочного материала (проволока, стержни, пластины), способом относительного перемещения автомата и заготовок (по отдельно стоящей или присоединённой колонне непосредственно по поверхности заготовок). Отдельным элементам сварочного автомата (например, ползунам) на разных этапах сварочного цикла может придаваться разная конфигурация.

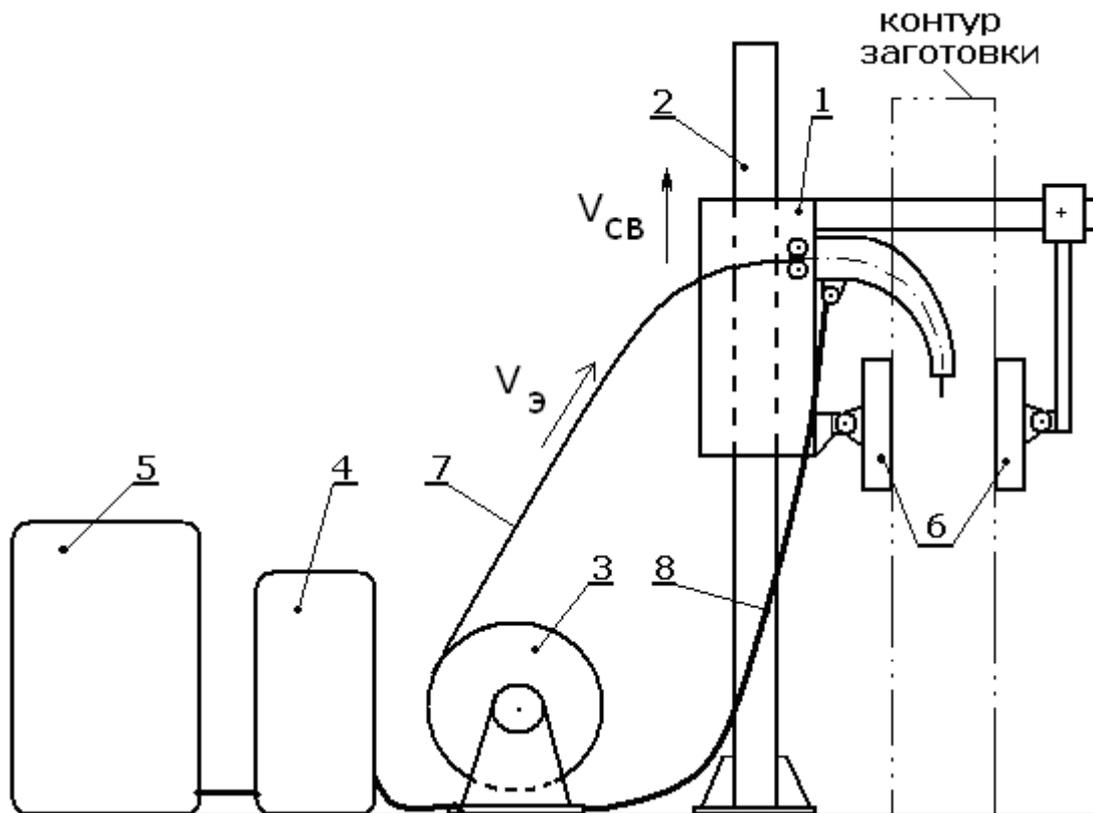


Рис. 5.2

В качестве вспомогательного оборудования при ЭШ-сварке применяют устройства для установки и закрепления свариваемых заготовок с прямолинейными кромками или механизмы для вращения трубчатых заготовок (роликовые стенды, торцевые вращатели). Приводы вращателей включаются в схему управления автомата и работают согласованно с остальными механизмами автомата. На рис. 5.3 показана схема поста для ЭШ-сварки цилиндрического корпуса. В этом случае автомат во время сварки неподвижен. Скорость сварки создаётся вращением заготовок 10 с помощью опорных роликов роликового стенда 9. Комплект двух плоских ползунов заменён внешним ползуном 6 с цилиндрической рабочей поверхностью и внутренним кольцом 10, закреплённым на заготовках.

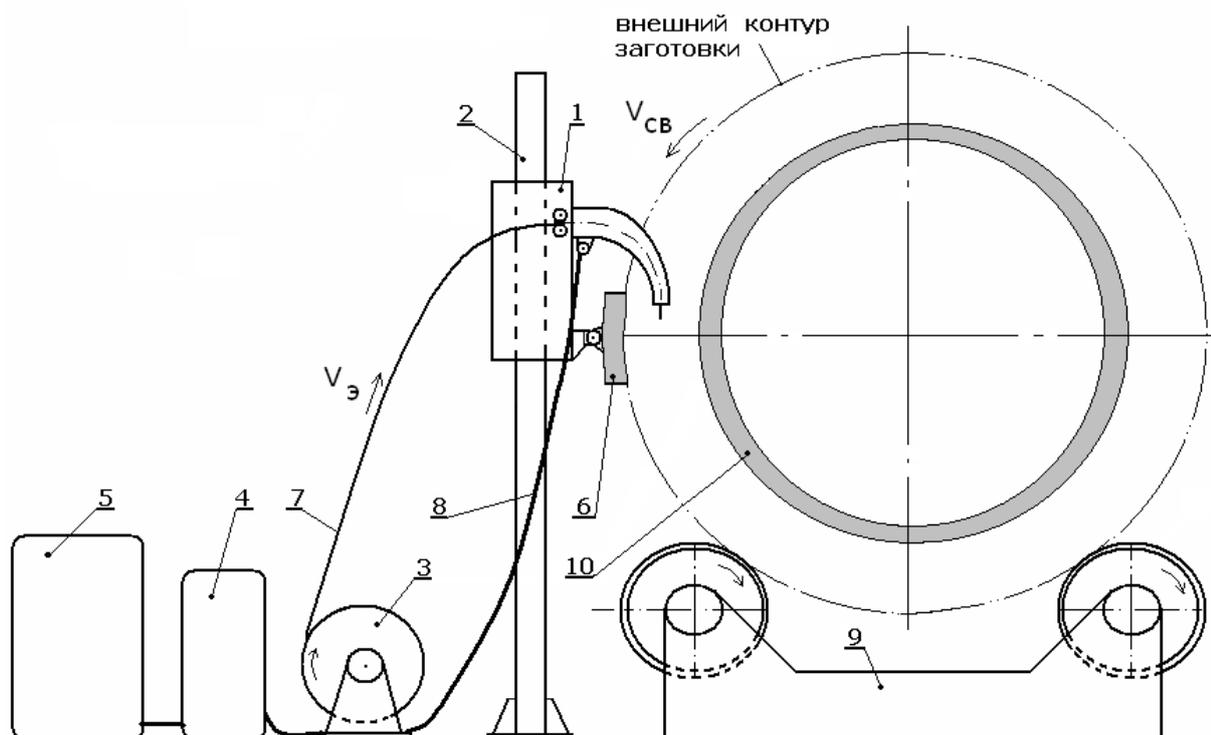


Рис. 5.3

5.3. Технология ЭШС

Качество торцов заготовок, свариваемых ЭШ-способом, обеспечивается машинной кислородной резкой. Более высокие требования предъявляются к состоянию боковых поверхностей, примыкающих к будущему шву, так как по ним должны беспрепятственно скользить ползуны. В случае сварки встык листовых заготовок разной толщины более толстые кромки механической обработкой доводят до размера более тонкой на ширине, достаточной для размещения ползуна. При сварке кольцевых швов механической обработке (протачиванию) могут быть подвергнуты обе заготовки, чтобы выровнять не только толщину кромок, но и диаметры заготовок и обеспечить их правильную цилиндрическую форму.

При установке заготовок перед сваркой необходимо обеспечить устойчивое и взаимно неизменное положение свариваемых заготовок с определенным зазором между их кромками – обычно в пределах 30...50 мм – что, во-первых, требуется для размещения мундштуков и штанги заднего ползуна и, во-вторых, для создания некоторого минимально необходимого объема сварочной ванны.

Устойчивость заготовок создают внешними раскосными креплениями, а правильное взаимное положение кромок – привариванием специальных технологических скоб со стороны заднего ползуна (рис. 5.4).

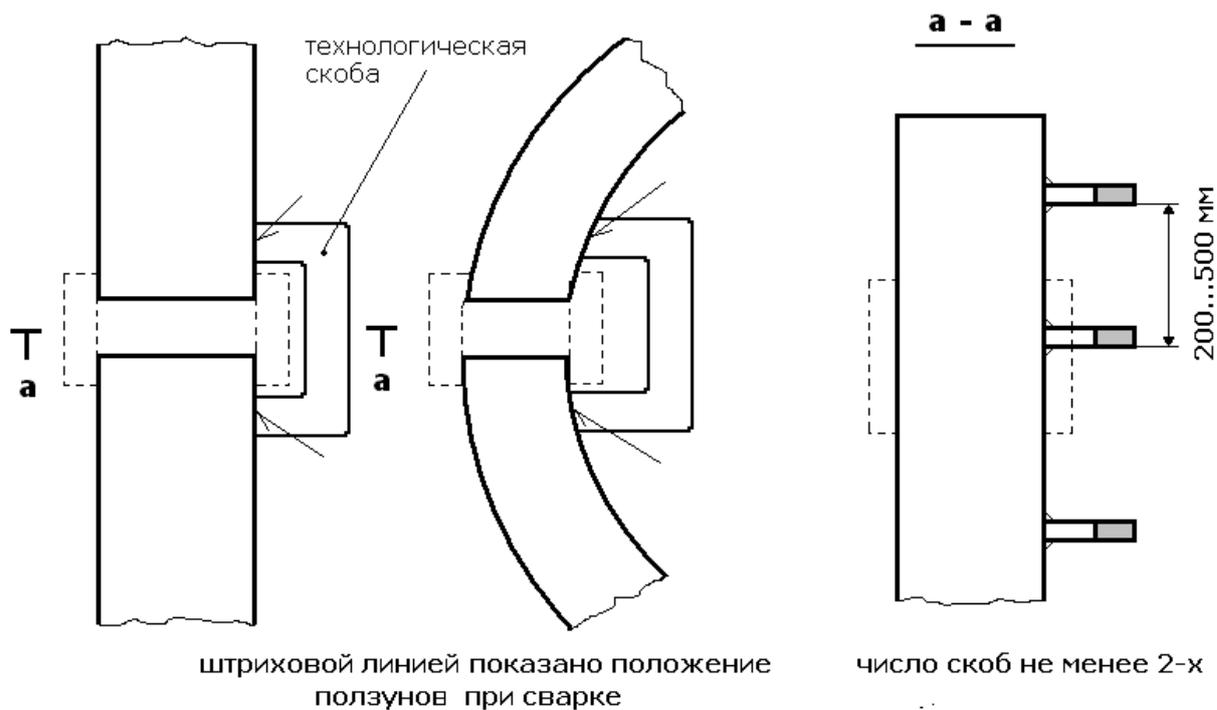


Рис. 5.4

Во избежание электролиза шлака процесс ведётся на переменном токе от специального трансформатора, чаще 3-х-фазного. В связи с этим число вводимых в сварочную ванну электродов должно быть кратно либо 2-м (при соединении обмоток трансформатора треугольником), либо 3-м (при соединении звездой, когда нулевой провод присоединяется к заготовкам). Это обеспечивает равномерную загрузку силовой электросети.

В качестве присадочного материала при ЭШС, помимо проволоки, могут применяться пластины или штанги. В соответствии с применяемым присадочным материалом изменяется конструкция и характер работы механизма, подающего присадку. В этом отношении практика ЭШС весьма разнообразна [1].

С помощью ЭШС выполняются прямолинейные и кольцевые швы, стыковые, угловые и тавровые соединения на заготовках из всех основных конструкционных материалов со скоростью 1...1,5 м/час, а также наплавка кромок заготовок (рис. 5.5). Производительность ЭШС в несколько раз выше производительности автоматической сварки под флюсом. Вместе с тем, малая скорость сварки и большой объём сварочной ванны обуславливают значительно более длительное пребывание металла сварного соединения при повышенных температурах, что ведёт к значительному росту зерна и, как следствие, к понижению пластичности металла. По этой причине после сварки чаще всего требуется проводить термообработку сварного соединения в виде отпуска.

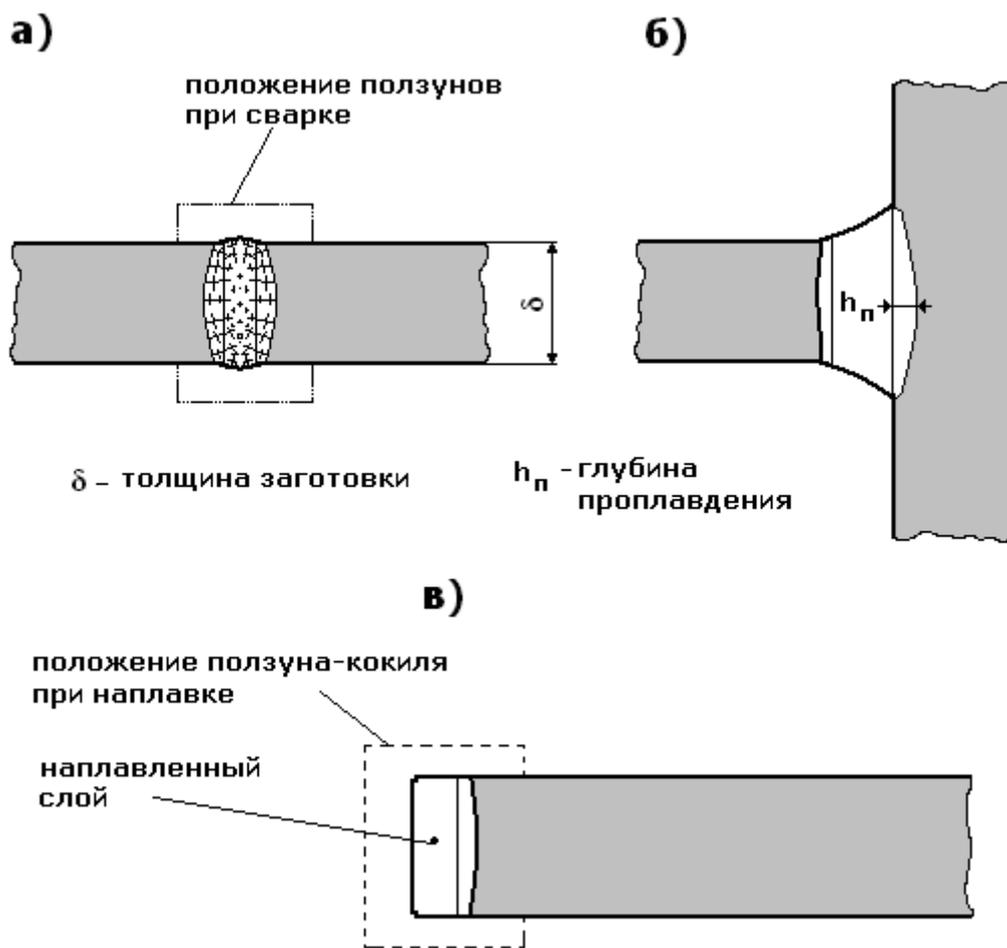


Рис. 5.5

Нижний предел толщины, свариваемой ЭШ-способом, составляет 30...50 мм и обусловлен температурными условиями, при которых ещё возможен устойчивый шлаковый процесс. Верхний предел свариваемой толщины не ограничен: известны случаи сварки стальных заготовок толщиной более 2 метров.

Флюс для ЭШС неэлектропроводен в твёрдом состоянии при низкой температуре расплава и электропроводен при высокой температуре расплава. Это позволяет начинать процесс в дуговой форме и по мере накопления массы шлака и повышения его температуры переводить в шлаковый.

Находит применение так называемый горячий старт ЭШС, при котором расплав шлака готовится в специальной печи и непосредственно перед началом сварки заливается в зазор между заготовками.

Начало и завершение процесса сварки прямолинейных и кольцевых швов имеют свои особенности.

При сварке заготовок с прямолинейными кромками процесс начинается в так называемом технологическом кармане, который создаётся специально

приваренными входными планками 1 и заглушкой 2 (рис. 5.6, а), а заканчивается на выводных планках 3. Таким образом, начальный и конечный участки шва, чреватые дефектами в виде несплавлений и усадочной раковины, выводятся за пределы изделия и срезаются по окончании сварки.

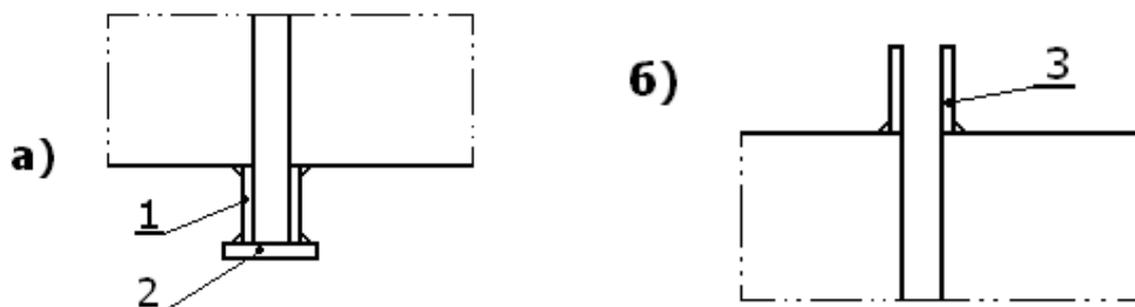


Рис. 5.6

Для начала сварки кольцевого шва в зазор между заготовками вваривают заглушку (рис.5.7, а) с таким расчётом, чтобы она своими концами оказалась заподлицо с наружной и внутренней цилиндрическими поверхностями заготовок. После установки наружного ползуна 6 и внутреннего кольца 10 заглушка становится дном технологического кармана и на ней возбуждают начальный дуговой процесс, который через некоторое время перейдёт в шлаковый. В таком стабильном режиме процесс сварки ведут до тех пор, пока начало шва не приблизится к его концу, то есть не наступит момент замыкания кольцевого шва.

Подготовку к моменту замыкания шва начинают тогда, когда начало шва встанет в диаметрально противоположное положение по отношению к сварочной ванне (рис. 5.7, б) Подготовка заключается в том, что заглушку и часть металла шва вырезают кислородным способом, образуя вертикальную стенку. Вместе с заглушкой удаляется дефектный начальный участок сварного шва. На рис.5.7, б эта удаляемая часть металла выделена косой штриховкой.

В момент, когда подготовленная часть приблизится к сварочной ванне (рис 5.7., в) над сварочной ванной устанавливают специальную форму (кокиль) 11 для вывода конца шва за пределы заготовок, прекращают вращение заготовок и включают вертикальное движение автомата. Ползун 6 выходит на открытые кромки кокиля 11. Вновь образующийся металл шва вначале заполняет пространство, образованное при вырезке начала шва, и соединяется с металлом начального участка шва, а затем сварочная ванна целиком переходит в кокиль, и здесь процесс сварки прекращается. В месте смыкания начала и конца шва после удаления кокиля образуется возвышение, которое срезают каким-либо способом. Рассмотренный технологический приём по-

звояет, с одной стороны, выполнить надёжное замыкание кольцевого сварного шва и вывести, с другой стороны, усадочную раковину из шва.

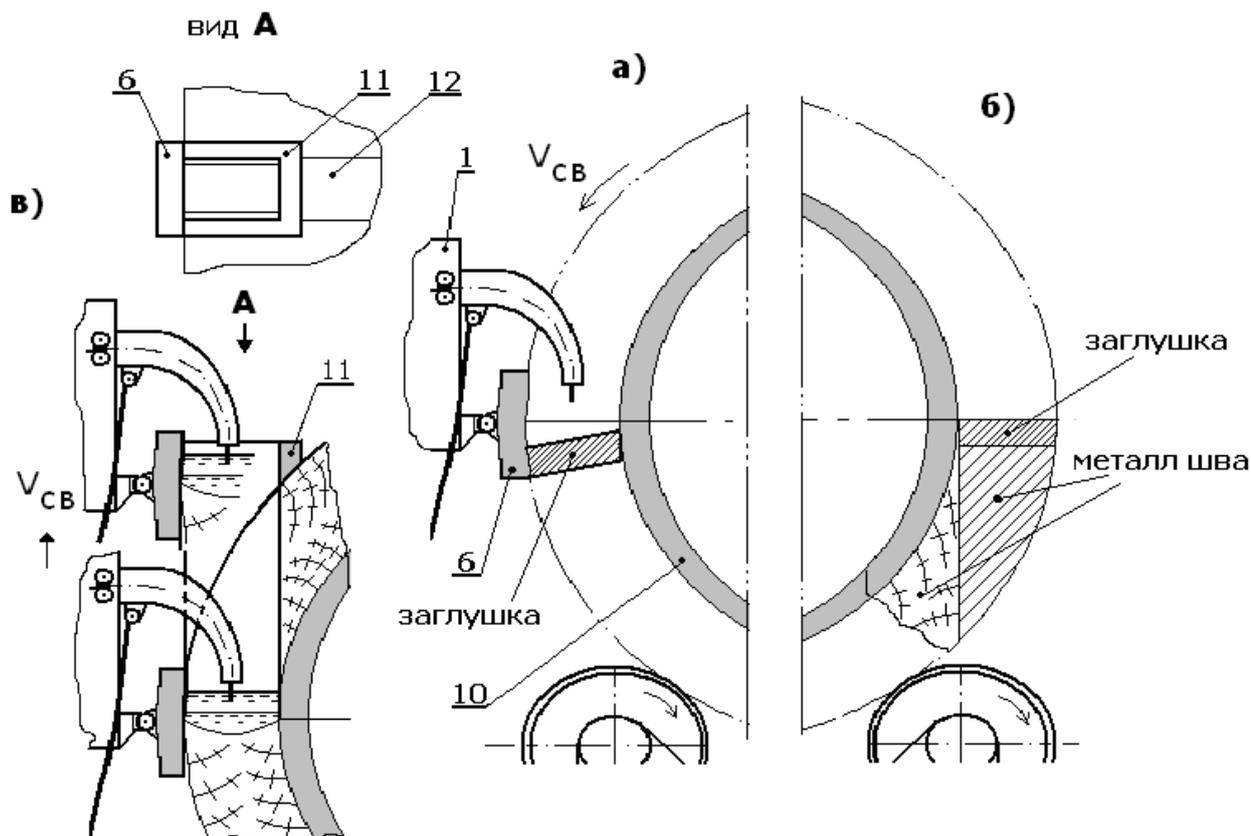


Рис. 5.7

При сварке крупных компактных в сечении заготовок типа коленчатых валов мощных судовых двигателей соединяемые фрагменты помещают в специальный охлаждаемый кокиль, который совместно с торцами заготовок образует пространство для размещения сварочной ванны. Размеры и форма кокиля назначаются такими, чтобы можно было образовать входной и выходной участки шва и создать припуск на последующую механическую обработку (рис. 5.8).

Режим ЭШС обеспечивает:

$I_{св}, A$ – фазный сварочный ток,

$U_{ш}, B$ – фазное напряжение на шлаковой ванне,

$V_{св}, м/час$ – скорость сварки,

$V_{э}, м/час$ – скорость подачи электродной проволоки,

$a, мм$ – амплитуда поперечных колебаний мундштука,

$t_{п}, с$ – длительность остановки мундштука у ползунов и др.

В зависимости от конструктивных и других особенностей свариваемых заготовок вид сварочного автомата и набор параметров режима сварки могут существенно изменяться.

5.4. Оборудование для ЭШС

Универсальный автомат для ЭШС включает следующие механизмы и устройства (рис. 5.9).

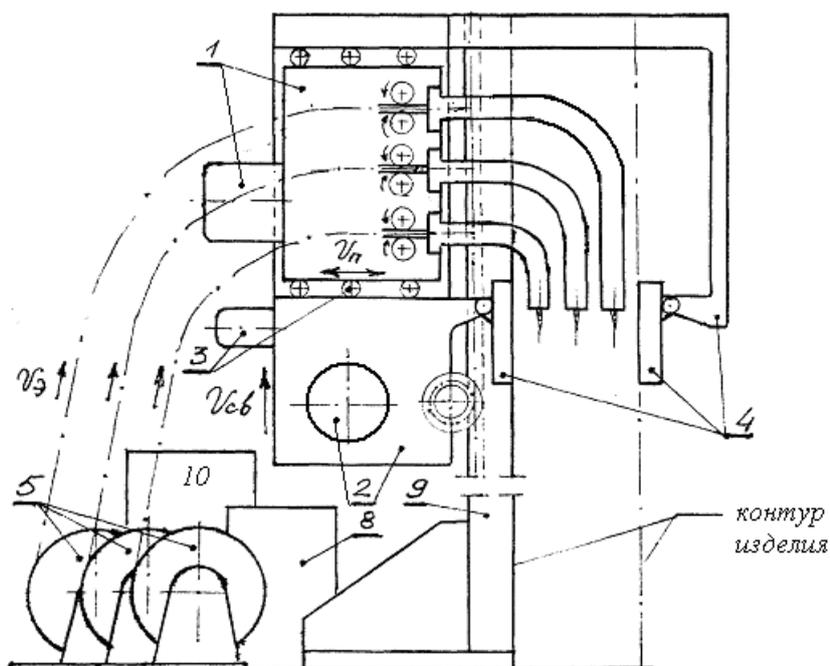


Рис. 5.9. Конструктивная схема автомата для электрошлаковой сварки включает:

- 1 – механизм и привод подачи электродной проволоки или другого присадочного материала;
- 2 – механизм и привод вертикального перемещения автомата;
- 3 – механизм и привод поперечных колебаний мундштука (мундштуков);
- 4 – ползуны с устройствами для их подвешивания;
- 5 – кассеты для электродной проволоки или кронштейны для удерживания электродных пластин;
- 6 – пульт управления с органами управления и контрольными приборами;
- 7 – бункер для флюса (не показан); 8 – шкаф управления;
- 9 – колонна с зубчатой рейкой для обеспечения прямолинейного вертикального перемещения сварочного автомата

Трансформатор для ЭШС имеет жёсткую внешнюю характеристику, а шлаковая ванна представляет собой практически линейное активное сопротивление и тем самым формируется линейная падающая характеристика источника, подобно тому, как это производится при питании нескольких постов РДС от общего источника питания с жёсткой внешней характеристикой.

В состав конструктивных элементов сварочного автомата входит также система водяного охлаждения ползунов. При сварке кольцевых швов сварочный автомат работает в комплекте с вращателем или роликовым стендом (рис. 5.3, поз 9), привод которого управляется с пульта автомата; в этом случае автомат неподвижен и скорость сварки поддерживается вращателем.

Электрошлаковая сварка чаще всего производится в заводских условиях; в монтажных условиях её используют при соединении крупногабаритных элементов сооружений и машин: обечаек водоводов при строительстве ГЭС, частей вращающихся обжиговых печей цементного производства, частей крупных прессов и т.п.

Контрольные вопросы

1. Какой источник тепла используется при ЭШС?
2. Основные особенности процесса ЭШС.
3. Каковы основные отличия металлургии ЭШС от металлургии дуговых способов сварки.
4. Как влияют условия выполнения ЭШС на свойства металла в сварном соединении?
5. Почему ЭШС выполняется на переменном токе?
6. Рациональные области применения ЭШС.

Рекомендуемая литература

1. Электрошлаковая сварка. Изд.2-е, испр. и доп. Под ред. академика Б.Е. Патона. Машгиз, М.-К., 1959.

6. ПЛАЗМЕННАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

6.1. Сущность и процесс плазменной обработки

Плазменная обработка материалов (ПО) – одна из разновидностей обработки материалов с использованием источников тепла с высокой плотностью мощности.

Плазменным этот способ называется потому, что применяемый источник тепла представляет собой некоторый объём или поток газа или пара, поддерживаемый в плазменном состоянии, то есть в состоянии с высокой степенью ионизации (свыше 90%).

Одним из способов перевода вещества в плазменное состояние является обжатие и вытягивание свободного дугового разряда. Свободная дуга имеет степень ионизации около 50%. Обжатие дуги (получение сжатой дуги) может быть выполнено в частности обтекающим потоком газа или пара. При этом за счёт одновременного вытягивания и уменьшения размеров поперечного сечения дуги существенно уменьшается её объём, а плотность мощности и температура, наоборот, существенно возрастают. Одновременно сам обжимающий газ или пар воспринимает температуру дуги и переходит в плазменное состояние – превращается в плазменную струю.

В свободной дуге при плотности мощности 10^6 Вт/см² достигается температура 6000...8000 °С, а в сжатой дуге и плазменной струе при плотности мощности 10^9 Вт/см² достигается температура в несколько десятков тысяч °С.

Аппарат, в котором создаётся и поддерживается плазменное состояние вещества, назван плазмотроном.

Плазмотрон генерирует два плазменных источника тепла – сжатый дуговой разряд (сжатую дугу) и плазменную струю. Сжатая дуга является первичным источником тепла, поскольку она питается энергией, подводимой от источника электродами, а плазменная струя, обеспечивая обжатие дуги, воспринимает её температуру и переходит в высокоионизированное состояние. Хотя оба этих источника, в сущности, два следствия одного процесса, при необходимости, плазменную струю можно выделить и использовать независимо от сжатой дуги.

Технологическая установка для плазменной обработки материалов включает плазмотрон, источник питания дуги, источник газа или пара и некоторые другие устройства и механизмы в соответствии с назначением установки.

Процесс образования сжатой дуги и плазменной струи в плазмотроне показан на рис. 6.1, на котором одновременно схематически показаны основные конструктивные элементы плазмотрона.

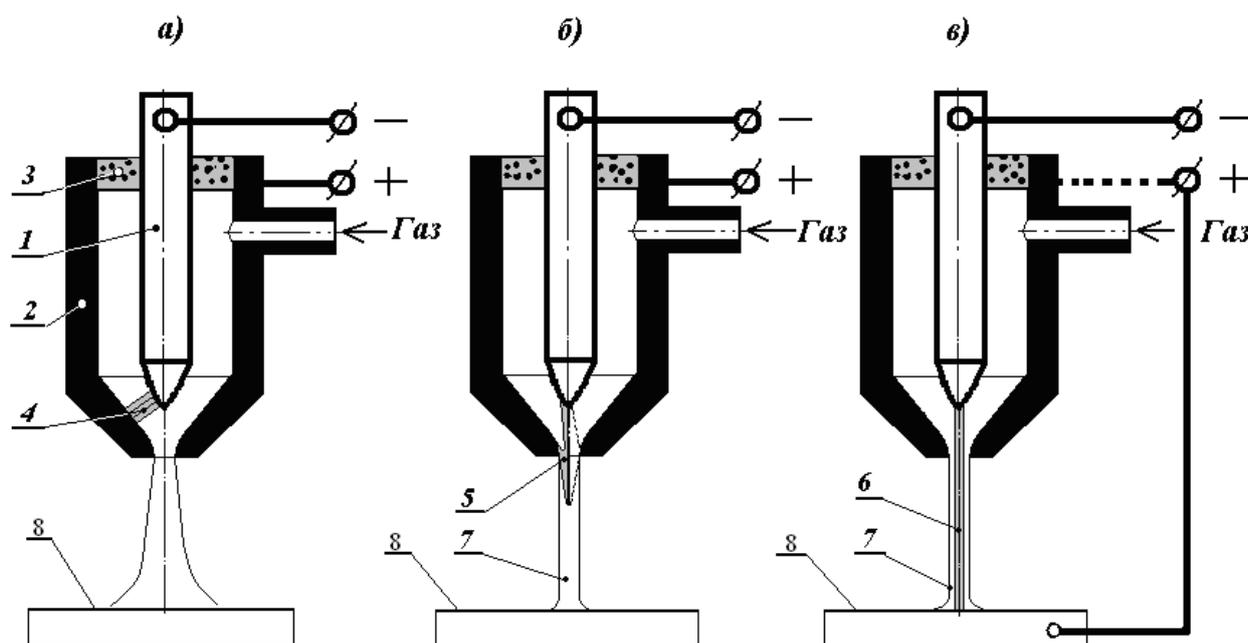


Рис. 6.1

Плазмотрон состоит из центрального электрода 1, цилиндрического полого корпуса 2, одновременно являющегося вторым (боковым) электродом, и разделительной электроизоляционной втулки 3. Втулка 3, кроме того, закрепляет электроды в неизменном соосном положении относительно друг друга. Электроды соединены с полюсами источника постоянного тока. В корпусе плазмотрона имеется патрубок, через который подается плазмообразующий газ. Открытая сторона корпуса является выходным соплом. Стенки сопла имеют специальный профиль, обеспечивающий истечение газа со сверхзвуковой скоростью.

Запуск плазмотрона производится в две стадии. Вначале бесконтактным способом (высоковольтным высокочастотным электрическим разрядом) возбуждается маломощная дежурная дуга 4 между центральным и боковым электродами (рис. 6.1, а). Одновременно подается газ с небольшим расходом. В маломощных плазмотронах находит применение контактный способ возбуждения дуги – кратковременное соприкосновение центрального электрода с боковым.

Для перехода во вторую стадию (рабочий режим) одновременно увеличивают ток через дугу и расход газа через сопло. Под действием обтекаю-

щей струи газа дуга вытягивается и сжимается в поперечном сечении. Это происходит как за счёт чисто механического воздействия, так и за счёт охлаждения (следовательно, – деионизации) наружных слоёв дуги. Это приводит к уменьшению объёма дуги. При неизменной или даже возрастающей мощности дуги происходит существенное возрастание температуры и степени ионизации газа в дуге.

Газовая струя, пересекая зону с высокой температурой, воспринимает эту температуру и приобретает высокую степень ионизации, то есть превращается в плазменную струю 7. Столб сжатой дуги 5, как уже отмечалось, изгибается и своей средней частью выходит за пределы корпуса плазмотрона в виде светящегося конуса (рис. 6.1, б). Вследствие перемещения активных пятен по поверхности электродов сжатая дуга быстро вращается вокруг оси центрального электрода.

При расположении дуги между электродами плазмотрона, как это показано на рис. 6.1, б, реализуется схема дуги косвенного действия по отношению к обрабатываемой заготовке 8. В этом случае на заготовку воздействуют тепловое излучение столба сжатой дуги и тепломассперенос плазменной струи. Схема с дугой косвенного действия может быть использована при тепловой обработке любых материалов – электропроводных и неэлектропроводных.

При обработке электропроводных материалов (в особенности при резке) энергетически выгоднее применять дугу прямого действия (рис. 6.1, в). Для этого после выхода на рабочий режим с косвенной дугой быстро переключают положительный полюс источника тока с корпуса плазмотрона на обрабатываемую заготовку. Дуга «перебрасывается» с корпуса плазмотрона на заготовку беспрепятственно, так как пространство между центральным электродом и заготовкой заполнено плазменной струёй, то есть, ионизировано и электропроводно. При дуге прямого действия на поверхности заготовки возникает дополнительный источник тепла – анодное активное пятно.

Вместе с тем, использование схемы с косвенной дугой позволяет регулировать тепловое воздействие на заготовку в более широких пределах, так как плотность мощности на поверхности заготовки можно изменять как изменением тока в дуге, так и взаимным положением плазмотрона и заготовки. При схеме с прямой дугой регулирование плотности мощности возможно только за счёт изменения тока дуги, а удаление плазмотрона от заготовки приводит к обрыву дуги.

6.2. Состав поста для плазменной обработки

Плазменная обработка может производиться при ручном и механизированном перемещении плазмотрона. Это отражается на конструктивном его оформлении. Для ручного варианта плазмотрон 1 снабжается рукояткой 2 (рис. 6.2, а, б), с помощью которой рабочий манипулирует плазмотроном.

Для механизированного варианта корпус плазмотрона снабжается посадочной поверхностью (рис. 6.2, в), с помощью которой он закрепляется на механизме перемещения технологической установки.

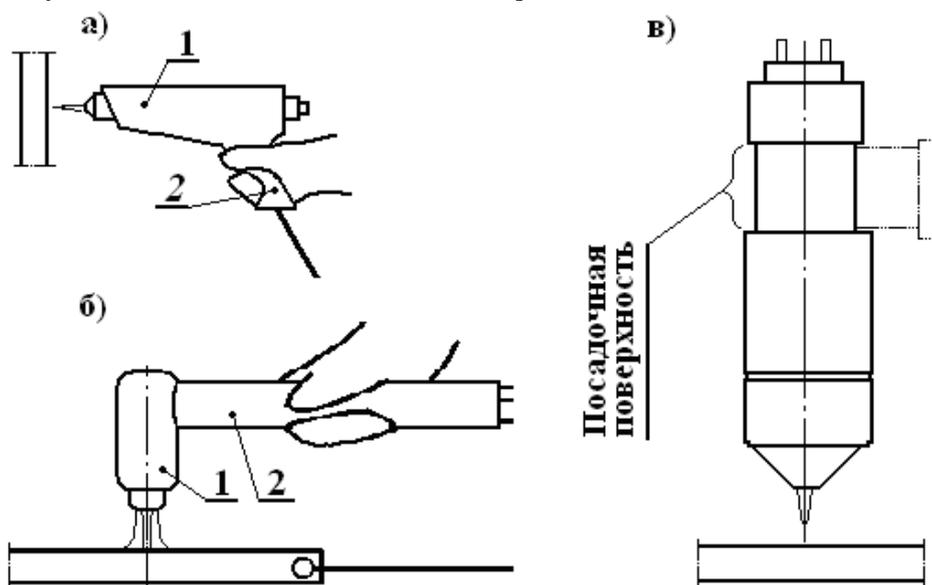


Рис. 6.2

Установка для плазменной обработки материалов с ручным перемещением плазмотрона (рис. 6.3) состоит из источника питания дуги 1, источника плазмообразующего газа (баллона) 2, плазмотрона 5, соединительных электрических кабелей 4, шкафа управления 3, в котором среди прочей пуско-регулирующей аппаратуры находится осциллятор для бесконтактного возбуждения дуги, шланга 6 для подачи газа и газового редуктора 7 для регулирования расхода газа.

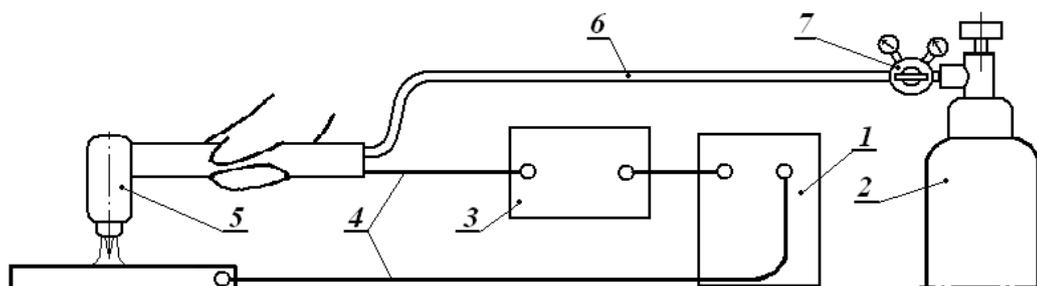


Рис. 6.3

Маломощные (до 3 кВт) установки с ручным перемещением плазмотрона получили название микроплазменных (см. далее).

Мощные плазменные установки имеют в своём составе двухкоординатный программноуправляемый механизм перемещения плазмотрона (рис. 6.4) или шарнирный механизм с механическим копированием (рис. 6.5).

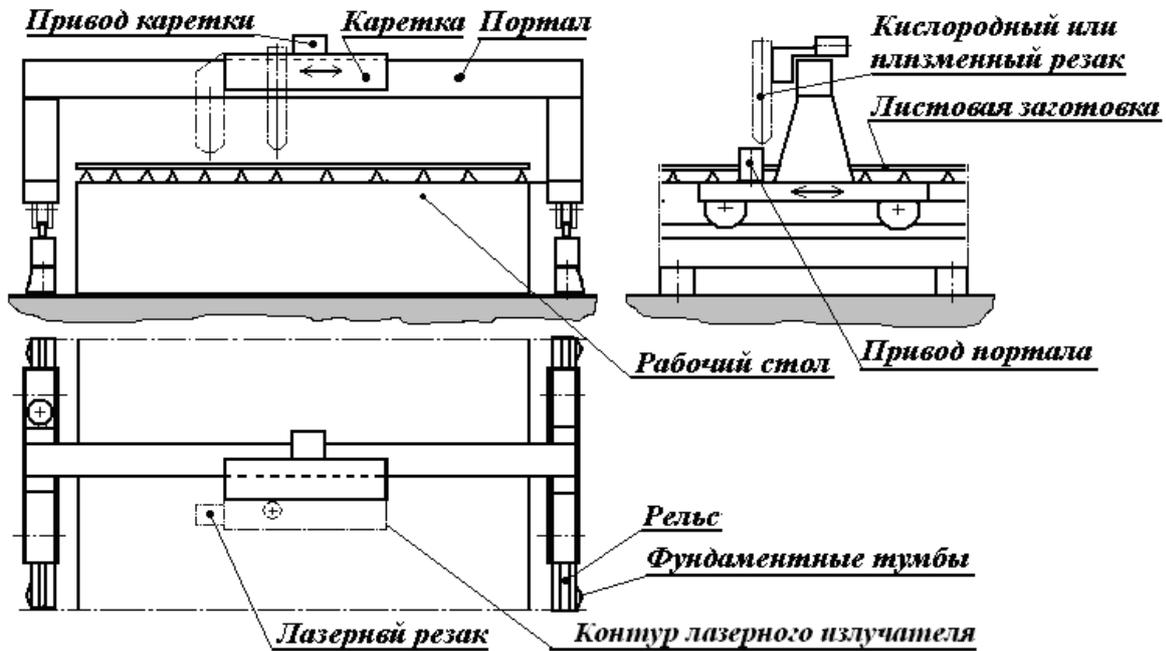


Рис. 6.4

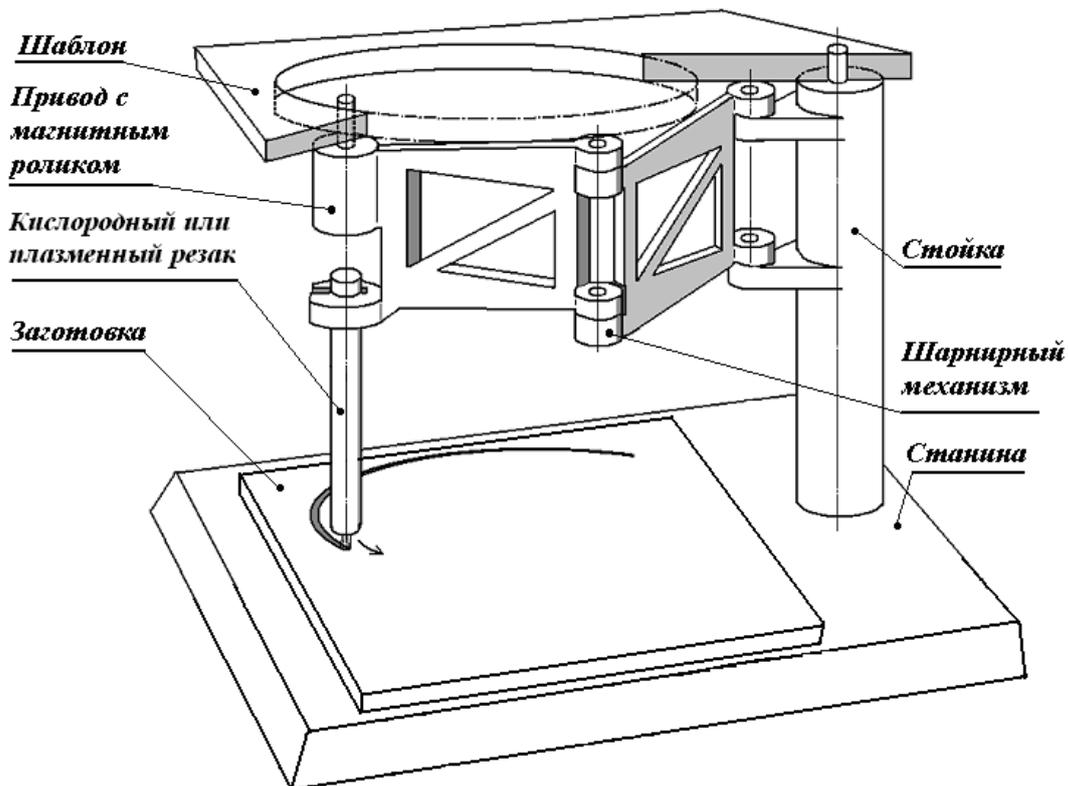


Рис. 6.5

6.3. Технологические свойства и возможности плазменной обработки

Технологические свойства и возможности (ТСВ) плазменной обработки определяются свойствами сжатой дуги и плазменной струи. Основные особенности плазменного источника тепла – высокая концентрация (плотность мощности), достигающая, как уже отмечалось, 10^9 ватт/см², и высокая температура сжатой дуги и плазменной струи (десятки тысяч °С). В то же время современные плазменные установки позволяют регулировать мощность в широких пределах – от единиц ватт до сотен киловатт. Такие энергетические характеристики позволяют производить тепловую резку практически любых материалов, сварку всех конструкционных материалов, пайку, термообработку металлических деталей.

В области резки плазменный способ превосходит кислородную резку по номенклатуре обрабатываемых материалов, но уступает по предельной толщине. Это связано с тем, что источник тепла при плазменной резке является внешним по отношению к обрабатываемой заготовке, и глубина реза ограничивается изотермой температуры плавления, в то время как при кислородной резке горит сам металл, то есть источник тепла внутренний.

6.4. Области применения плазменной обработки материалов

Плазмотроны в различных конструктивных оформлениях и в составе различных технологических машин применяют для резки металлов (сталей до 100 мм) и неметаллов (рис. 6.6) для сварки и наплавки металлов, для напыления металлов и неметаллов на поверхность деталей (рис. 6.7), переплава металлов и в других случаях.

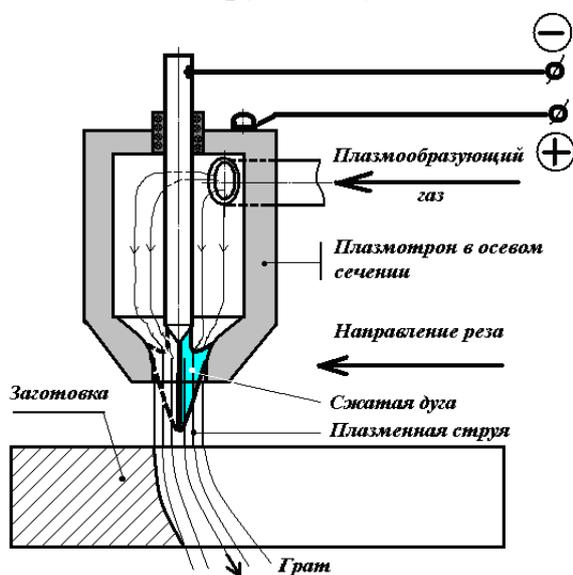


Рис. 6.6

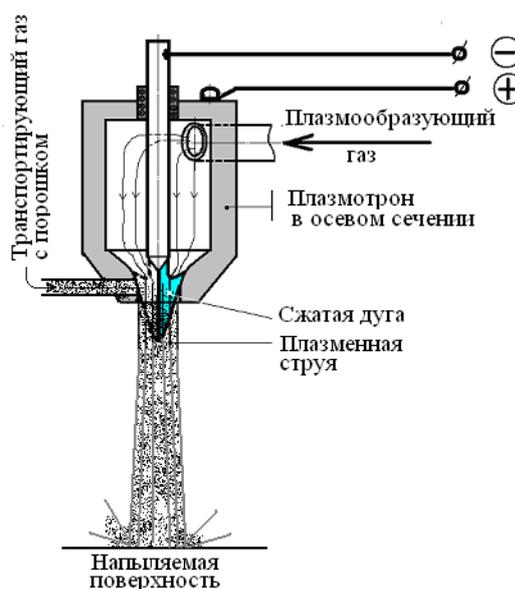


Рис. 6.7

6.5. Оборудование для ПО

Мощные плазменные установки, как правило, специализированы на резке металлов, маломощные плазменные установки обычно выполняются достаточно универсальными и используются для резки тонких металлов (порядка 1...5 мм), для сварки и пайки. Примером такой установки может служить установка «Плазар».

Установка «Плазар» предназначена для:

- тепловой резки и сварки металлов толщиной до 5 мм,
- пайки и поверхностной термообработки металлов,
- тепловой резки неметаллов и
- других видов обработки материалов, требующих местного нагрева.

Потребляемая установкой мощность – до 1,8 кВт при напряжении питающей электрической сети 220 В с частотой 50 гц. Расходуемый установкой технологический материал – дистиллированная вода – является плазмообразующей средой.

В состав установки входят (рис. 6.8) блок питания и управления 1; горелка 2; многожильный кабель 3.

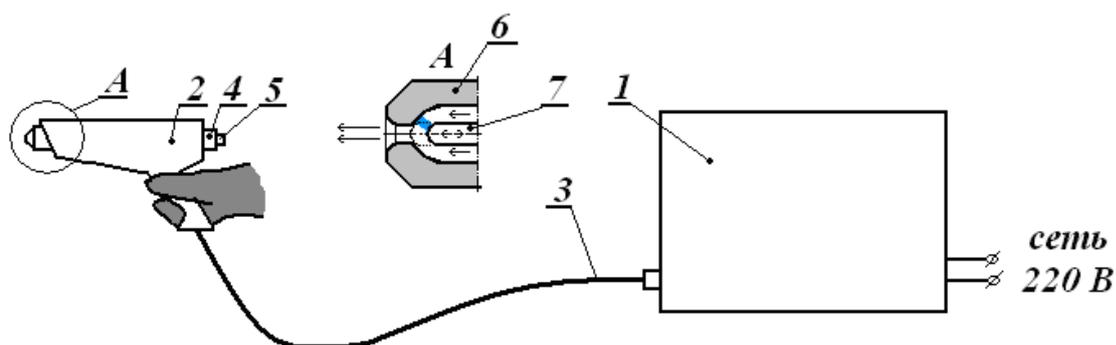


Рис. 6.8

Блок питания 1 включает источник питания сжатой дуги постоянным током с напряжением до 300 В и комплект пуско-регулирующей аппаратуры, индикаторы и органы управления которой выведены на переднюю панель (рис. 5.9). Трансформатор и выпрямитель обдуваются вентилятором. Кнопками 3 устанавливается номер ступени регулирования (номер режима), который отражается цифровым индикатором 4. Одновременно цифровым индикатором 5 высвечивается величина напряжения на дуге. Подключение плазмотрона к источнику питания и отключение производятся соответственно кнопками 9 и 10 и отражается световыми индикаторами 7 и 8. Температу-

ра корпуса плазмотрона контролируется температурным датчиком 8 (рис. 6.9). В случае перегрева корпуса (например при израсходовании жидкости) датчик даёт команду на отключение плазмотрона от источника тока и включает световой индикатор 6 «перегрев».

Горелка 2 (рис. 6.8) является рабочим органом установки «Плазар». Конструктивная схема горелки, выполненной в форме пистолета, приведена на рис. 6.10. Внутри пластмассового кожуха 9 размещаются плазмотрон (детали поз. 1, 2, 3, 6 и 7) и ёмкость 4 для плазмообразующей жидкости с заливной горловиной 5. Часть этой ёмкости выполнена в форме рукоятки. Плазмотрон (принципиальная схема на рис. 6.1) конструктивно состоит из сопла-анода 1, накидной гайки 2, центрального электрода-катода (на схеме не показан) и корпуса 3 с трубчатым хвостовиком. Хвостовик проходит через канал в ёмкость 4. На правом конце хвостовика располагается гайка 6 для регулирования длины дуги и пусковая кнопка 7. Кнопка 7 соединена стержневым толкателем с центральным электродом-катодом, при кратковременном соприкосновении которого с соплом-анодом возбуждается дуга.



Рис. 6.9

Накидная гайка 2 соединяет и взаимно центрирует сопло, центральный электрод, завихритель плазмы (на схеме не виден) и корпус 3. Через корпус 3, который одновременно является передней стенкой ёмкости 4 и испарителем, по тонким каналам в межэлектродное пространство поступает пар.

К корпусу 3 пластинчатой пружиной прижат термочувствительный электрический датчик 8. В случае повышения температуры корпуса сверх нормативной возросший ток в цепи датчика приводит в действие выключатель, отсоединяющий плазмотрон от источника питания.

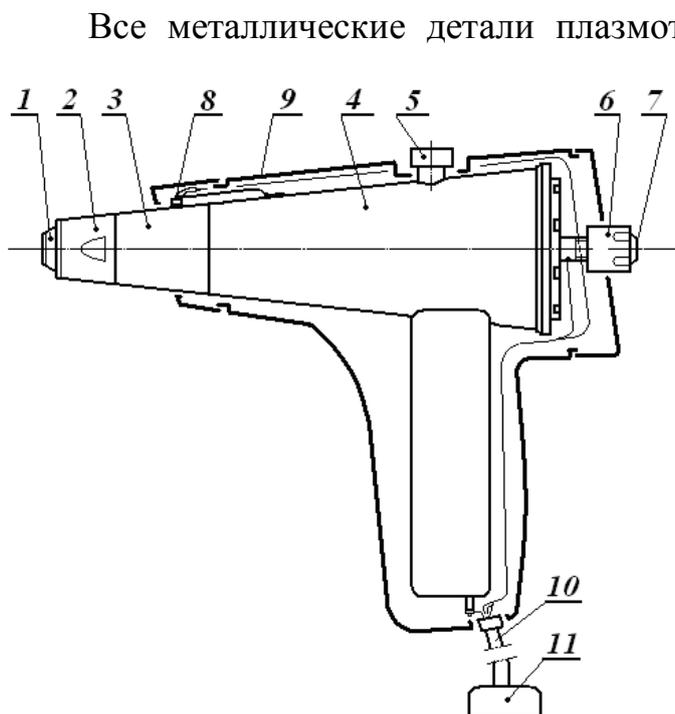


Рис. 6.10

Все металлические детали плазмотрона включены в электрическую цепь питания дуги, поэтому провод от положительного полюса источника питания присоединён к рукоятке, а от отрицательного полюса – к толкателю центрального электрода. Толкатель центрального электрода электрически изолирован от трубчатого хвостовика корпуса 3. Пластмассовый корпус горелки и электроизоляционный материал гайки 6 и кнопки 7 предотвращают прикосновение оператора к токонесущим частям плазмотрона.

В отличие от ранее рассмотренной схемы бесконтактного возбуждения дуги (рис. 6.1), при котором возникает автоэлектронная эмиссия, в установке «Плазар» для возбуждения дуги используется кратковременное короткое замыкание центрального электрода на внутреннюю поверхность бокового электрода (сопла-анода), то есть создаётся термоэлектронная эмиссия. Рабочий зазор между электродами регулируется вращением гайки 6 в ту или иную сторону.

Контрольные вопросы:

1. Действием каких факторов производится сжатие дуги?
2. Что такое «плазмообразующее вещество»?
3. Основные технологические свойства сжатой дуги и плазменной струи.
4. Состав установки и назначение её компонентов.
4. Какие процессы происходят в плазмотроне установки «Плазар» при её запуске?

Рекомендуемая литература

1. Черкасов, В.К. Концепции современных технологий: учебное пособие / В.К. Черкасов, Н.А. Сигов.-Вологда: ВоГТУ, 2005.- 100 с.

7. ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

7.1. Сущность и процесс лазерной обработки

Под лазерной обработкой понимают целенаправленное воздействие на материал обрабатываемой заготовки особым видом электромагнитного излучения, генерируемого (создаваемого) прибором, получившим название «лазер». Термин «лазер» – это русифицированный аналог английской аббревиатуры $L_{ight} A_{mplification} \text{ by } S_{timulated} E_{mission} \text{ of } R_{adiation}$, что в переводе на русский язык означает «усиление света вынужденным излучением». Исторически сложилось так, что название процесса перешло на название прибора, в котором это процесс происходит.

Лазерная обработка материалов включает несколько частных способов: резку, термораскалывание, сварку, наплавку, термообработку, переплав металлов и др. Все эти способы основаны на применении в качестве источника тепла пятна нагрева в месте встречи лазерного луча с поверхностью обрабатываемой заготовки. В пятне нагрева происходит преобразование электромагнитной энергии направленного потока фотонов в тепловую форму. Конкретный результат этого преобразования зависит от свойств фотонов и их концентрации в пятне нагрева. Таким образом, при лазерной обработке энергия подводится в лучевой форме, а используется в тепловой.

7.2. Природа и свойства лазерного излучения

Лазерный луч, как уже отмечалось, - направленный поток фотонов. Фотон – квант (порция) электромагнитной энергии, испускаемый возбуждённым электроном атома при возвращении на стационарный (нулевой) энергетический уровень. Свойства отдельного фотона определяются его частотой, запасом энергии и вектором. Частоты фотонов охватывают диапазон от инфракрасного до ультрафиолетового излучения. Некоторый участок этого диапазона (красный – фиолетовый) принято называть видимым светом, так как он воспринимается глазом человека. Остальная часть диапазона может быть обнаружена либо с помощью специальных приборов, либо по результату его воздействия на материальные объекты.

Важнейшие особые свойства лазерного излучения:

- *монохроматичность* (одноцветность),
- *когерентность*,
- *направленность* и
- *малая расходимость*.

В то же время, будучи оптическим, лазерное излучение подчиняется общим законам оптики – отражения и преломления на границах раздела сред.

Излучение известных источников света (например, Солнца) полихроматично (многоцветно), так как составляет смесь фотонов разных частот, воспринимаемую нашими зрением как белый цвет. Лазерное излучение, в отличие от излучения других источников света, является сугубо монохроматичным (одноцветным), то есть составляется фотонами одной частоты. Этот факт наглядно иллюстрируется пропусканием светового луча через грани стеклянной призмы (рис. 7.1): полихроматический солнечный свет из-за разницы коэффициентов преломления фотонов разной частоты разворачивается в линейный спектр на красный (к), оранжевый (о), жёлтый (ж), зелёный (з), голубой (г), синий (с) и фиолетовый (ф) участки. Монохроматический лазерный луч при прохождении через призму только меняет направление.

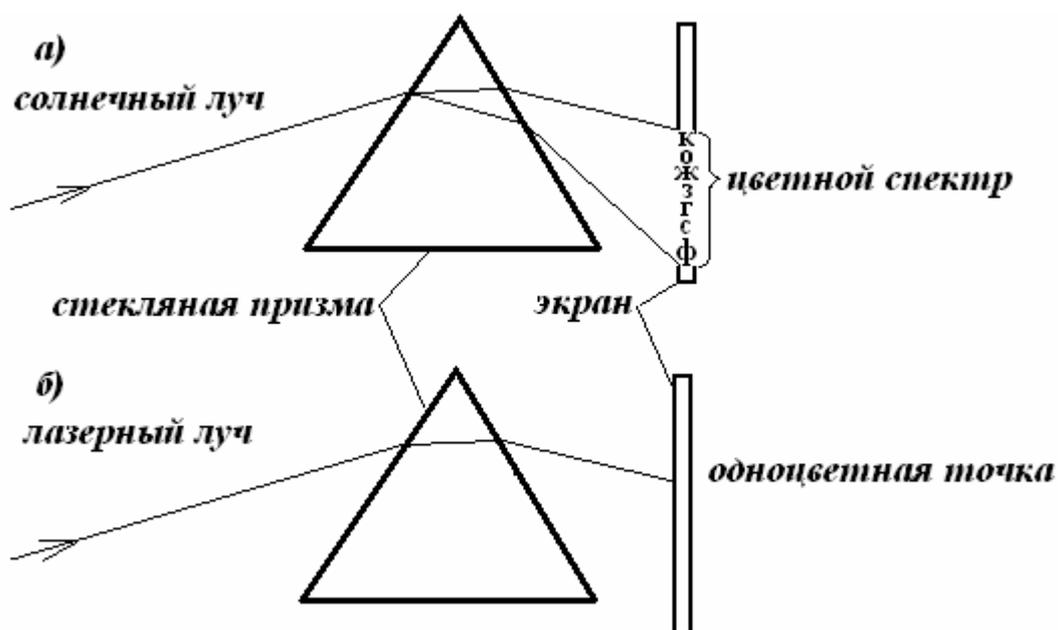


Рис. 7.1

Лазерное излучение когерентно. Это означает, что фотоны, его составляющие, находятся в одной фазе (синфазны). Другими словами, разные волновые пакеты фотонов (цуги) составляют одну волну независимо от их взаимного положения на оси луча (рис. 7.2).

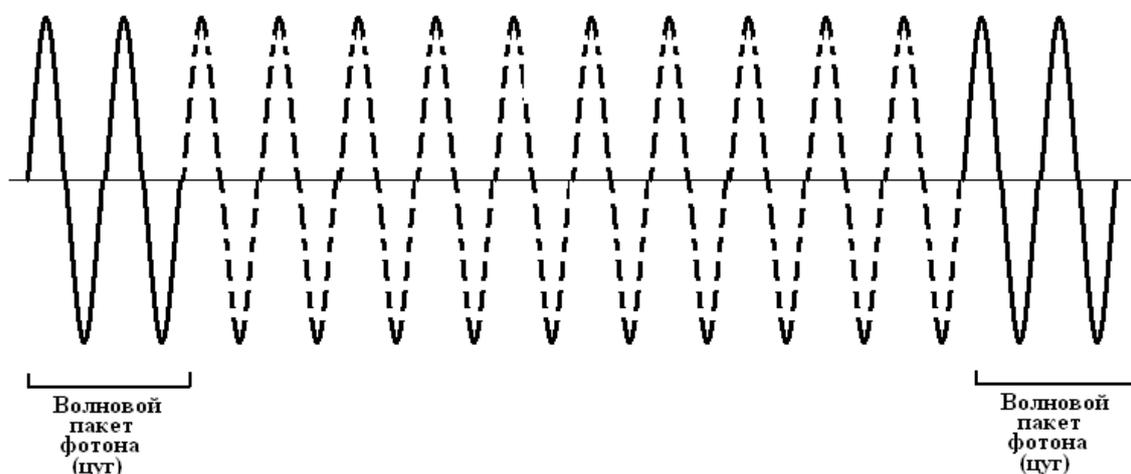


Рис. 7.2

Лазерное излучение направленно, то есть оно может быть только в форме луча, имеющего начало в месте его формирования, но не имеющего, фигурально выражаясь, конца.

Лазерный луч имеет малую расходимость, то есть размер поперечного сечения луча по мере удаления от источника (излучателя) увеличивается мало. Расходимость возникает не как свойство самого лазерного излучения, а вследствие погрешностей в работе излучателя. Расходимость оценивается величиной *угла расходимости* β (рис. 7.3).



Рис. 7.3

В земной атмосфере, и тем более в космическом вакууме, энергия лазерного излучения рассеивается слабо, что позволило, например, непосредственно измерить расстояние от Земли до Луны, что ранее производилось только косвенными вычислениями. В других более плотных прозрачных средах (стёклах, кристаллах) рассеяние лазерного излучения несколько больше. В настоящее время производится повсеместная замена медных проводников в системах связи на волókна из оптического стекла, по которым в качестве носителя информации пропускается лазерный луч.

7.3. Генерация лазерного излучения и формирование лазерного луча

Генерация лазерного излучения связана с возбуждением электронов вещества, с их энергетической *накачкой*. Возбуждение электронов любого вещества выражается в переходе их с основного энергетического уровня на какой-либо более высокий при введении в вещество некоторой энергии (рис. 7.3).

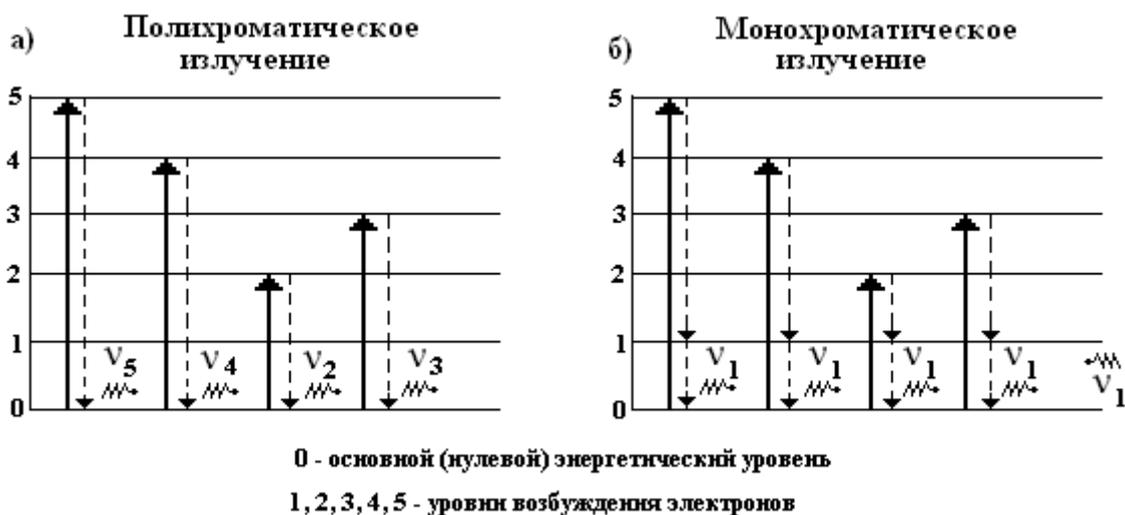


Рис. 7.3

В большинстве веществ возбуждённые электроны возвращаются на основной энергетический уровень самопроизвольно (спонтанно), независимо от состояния других электронов, излучая при этом ранее полученную порцию энергии в виде фотона (рис. 7.3, а). Частота ν (цвет) излучённого фотона зависят от того, с какого энергетического уровня возвращается электрон.

Таким образом, в большинстве веществ масса возбуждённых электронов при спонтанном возвращении на основной энергетический уровень излучает массу фотонов разной частоты: $\nu_2, \nu_3, \nu_4, \nu_5$ (разного цвета), то есть создают в сумме полихроматическое излучение.

В некоторых веществах по-разному возбуждённые электроны при возвращении на основной уровень безизлучательно переходят на некоторый промежуточный уровень (на рис. 7.3, б – на 1-й) и задерживаются на нём на неопределённое время. Создаётся *инверсная заселённость* промежуточного энергетического уровня.

Сход электронов с этого уровня на основной происходит вынужденно под влиянием внешних фотонов с частотой, соответствующей этому промежуточному уровню (т.е. ν_1). Таким образом, все электроны, возвращающиеся с промежуточного уровня на основной, излучают фотоны одной частоты, то есть дают монохроматическое излучение. Кроме того, излучённые фотоны ко-

герентны, то есть, как уже отмечалось, на любом расстоянии от источника излучения два произвольно взятых фотона находятся в одной фазе (синфазны, см. рис. 7.2).

Вещества, обладающие свойством инверсной заселённости какого-либо промежуточного энергетического уровня электронов, назвали *лазерными*. Среда, в которой размещается лазерное вещество, может быть в разном агрегатном состоянии: твёрдом, жидком, газообразном. Ограниченная часть среды, содержащая активное лазерное вещество, получила название *активного элемента*.

Генерацию лазерного излучения удобно и наглядно можно рассмотреть на примере работы так называемого твёрдотельного лазера с оптической накачкой, схема которого приведена на рисунке 7.4.

Любой лазер в явной или неявной форме содержит три составных части: излучатель 1, источник энергии 6 и стартёр 7.

Процесс генерации лазерного излучения и формирования лазерного луча происходит в излучателе 1, который содержит в своём составе активный элемент 2, средство энергетической накачки 3 активного элемента 2 и оптический резонатор в виде двух параллельных зеркал – полупрозрачного 4 и непрозрачного 5.

В рассматриваемом лазере оптическая накачка производится с помощью дуговой или импульсной лампы, которая получает питание от источника тока 6.

Генерация лазерного излучения и формирование лазерного луча происходят следующим образом. После подключения с помощью стартёра 7 лампы 3 к источнику 6 свет от лампы возбуждает электроны лазерного вещества, равномерно распределённого в массе твёрдотельного активного элемента 2. Одновременно в массу активного элемента от лампы, наряду с фотонами различных частот, попадают фотоны, соответствующие промежуточному уровню лазерного вещества, например, ν_1 .

Электроны лазерного вещества при возвращении на начальный энергетический уровень задерживаются на промежуточном уровне, откуда фотон ν_1

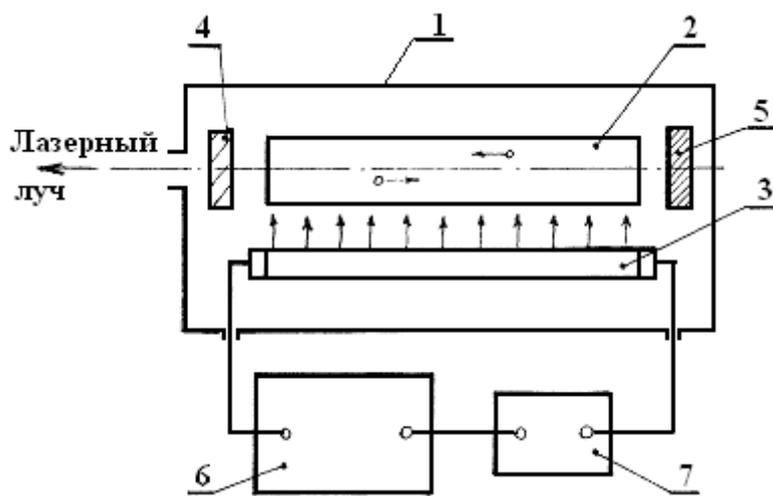


Рис. 7.4

от лампы вынуждает их вернуться на начальный уровень. Излучённый при этом новый фотон ν_1 побудит другие электроны, задержавшиеся на промежуточном уровне 1 (рис. 7.3) вернуться на начальный уровень с излучением фотонов ν_1 . По этой схеме процесс генерации фотонов ν_1 примет лавинообразный характер.

Фотоны, обладая индивидуальными векторами движения, будут покидать пределы активного элемента, но процесс генерации новых фотонов будет продолжаться, если будет работать лампа накачки.

Для формирования из массы хаотично движущихся фотонов лазерного луча активный элемент 2 располагают между параллельными отражающими поверхностями зеркал 4 и 5. Те фотоны, вектор которых оказывается перпендикулярным к отражающим поверхностям, после многократного отражения между ними вследствие резонанса увеличивают свою энергию настолько, что преодолевают энергетический барьер полупрозрачного зеркала 4 и выходят за пределы излучателя, образуя лазерный луч.

Чтобы обеспечить резонансное взаимодействие фотонов с отражающими поверхностями зеркал резонатора, последние размещаются друг от друга на расстоянии, кратном длине полуволны фотона ν_1 .

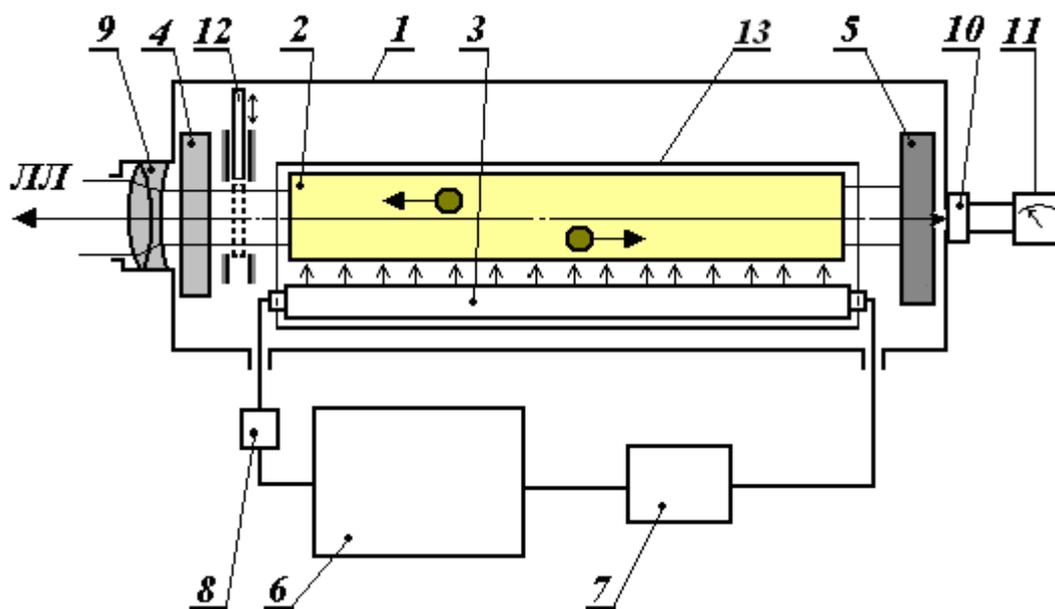


Рис. 7.5

На рис. 7.5 показан конструктивный вариант схемы твёрдотельного лазера по рис. 7.4; на нём дополнительно отмечены коллиматор 9, датчик мощности 10, индикатор мощности 11, затвор 12 и отражатель 13. Их назначение и действие будет изложено далее.

Свойствами лазерного луча, определяющими области и способы его практического применения, являются монохроматичность и малая расходимость. Монохроматичность позволяет с помощью фокусирующих устройств получать плотности тепловой мощности порядка $10^9 \dots 10^{12}$ Вт/см², что на порядки выше возможностей большинства других источников тепла; фотонная природа, монохроматичность и малая расходимость лазерного луча позволяют передавать его на значительные расстояния без искажения свойств.

Вместе с тем, простота фокусировки и регулирования интенсивности накачки дают возможность в широких пределах регулировать как мощность, так и плотность мощности лазерного луча, и поэтому его можно применить в различных способах обработки самых разнообразных материалов и в различных сочетаниях с другими способами обработки.

7.4. Классификация лазеров

Всё многообразие современных лазеров охватывается классификацией по различным существенным отличительным признакам.

По *длине волны излучения* различают лазеры, дающие излучение в видимой части оптического диапазона, и лазеры, дающие излучение в невидимой части, чаще всего, – в инфракрасной;

по *агрегатному состоянию активного элемента* различают лазеры твёрдотельные, газовые, жидкостные;

по *способу накачки активного элемента* различают лазеры с оптической накачкой, с газоразрядной накачкой, химические лазеры, полупроводниковые лазеры;

по *режиму испускания луча* различают импульсные лазеры, повторно-импульсные, лазеры непрерывного излучения;

по *конструктивным особенностям* различают лазеры с компактными активными элементами и оптоволоконные;

по *мощности* различают лазеры маломощные (до 10 милливольт), средней мощности (от единиц до сотен ватт), большой мощности (от единиц до десятков киловатт);

по *назначению* и области применения различают указательные, измерительные, маркировочные, медицинские, лазеры для целей связи, технологические лазеры и др.

7.5. Технологическое применение лазеров



Рис. 7.6

На рис. 7.6 показаны формы проплавления металла свободной дугой и лазерным лучом одинаковой тепловой мощности.

При кинжальной форме проплавления создаётся более равномерный прогрев металла по толщине и, следовательно, возникают очень малые остаточные относительные угловые перемещения заготовок после сварки, меньшая зона термического влияния и зона пластических деформаций и, следовательно, очень малая поперечная усадка. Это позволяет во многих случаях избегать операций дополнительной термообработки и правки сваренных заготовок. Кроме того, лазерную сварку в большинстве случаев можно выполнять без присадочного материала и в качестве *заключительной операции*.

В таблице 7.1 приведены основные параметры режима лазерной обработки. В конкретных случаях обработки могут быть введены дополнительные параметры. Например, при поверхностной термообработке тел вращения потребуется ввести параметр «шаг траектории, мм» либо «скорость перемещения луча вдоль оси вращения заготовки, м/с».

Таблица 7.1

Параметры режима и их размерности	Характер излучения	
	непрерывный	импульсный
Длина волны излучения, мкм	+	+
Мощность луча, Вт	+	-
Энергия импульса, Дж	-	+
Средняя мощность импульса, Вт	-	+
Средн. мощн. импульсного цикла, Вт	-	+
Длительность импульса, с	-	+
Частота следования импульсов, гц	-	+
Скорость перемещения луча, м/с	+	-
Координата фокуса, ± мм	+	+
Расход защитно-продувочного газа	+	+

В технологических целях находит применение почти весь диапазон светового излучения от инфракрасного с длиной волны $1 \cdot 10^{-5} \dots 7,5 \cdot 10^{-5}$ м (10...75 мкм) до ультрафиолетового с длиной волны $1,8 \cdot 10^{-7} \dots 4,0 \cdot 10^{-7}$ м (0,18...0,4 мкм). Чаще всего в качестве технологических применяются твёрдотельные лазеры на алюмо-иттриевом гранате, генерирующие излучение с длиной волны 1,063 мкм в инфракрасной части оптического диапазона, и газовые CO₂ – лазеры, генерирующие излучение с длиной волны 10,06 мкм также в инфракрасной части оптического диапазона.

Падающее на поверхность заготовки лазерное излучение частично поглощается, частично отражается. Это явление количественно оценивается коэффициентом отражения R или коэффициентом поглощения $A=1-R$. Понятно, что чем выше коэффициент поглощения, тем полнее используется энергия лазерного луча. Величина коэффициента поглощения зависит от длины волны лазерного излучения, природы обрабатываемого материала, состояния поверхности заготовки и её температуры.

Чистые гладкие металлические поверхности отражают бóльшую часть лазерного излучения. Окисление и нагрев поверхности в несколько раз увеличивают коэффициент поглощения (табл. 7.2, [2]).

Таблица 7.2

Коэффициент поглощения A (при длине волны излучения $\lambda=10,6$ мкм)

Металл	A поверхности	
	полированной неокисленной	окисленной (T=873 °K, t=2 ч)
золото	0,010	0-
алюминий	0,034	0,25...0,50 (ув.8-13 раз)
железо	0,050	0,33...0,74 (ув.6-15раз)
цирконий	0,083	0,45...0,56 (ув.5-7 раз)
титан	0,094	0,18...0,25(ув.2-2,5раза)

Коэффициент поглощения возрастает также при встрече луча с шероховатой поверхностью, однако специально увеличивать шероховатость экономически и технически нецелесообразно. Эффективным средством повышения коэффициента поглощения является нанесение специальных покрытий, по своей природе хорошо поглощающих лазерное излучение, например, красящие составы, содержащие оксиды металлов Al, Zn и др. Материал этих покрытий недорог, доступен, а техника их нанесения предельно проста: кистью или распылителем.

Как видно из таблицы 7.1, в случае применения импульсного режима параметр «мощность луча» для непрерывного излучения заменяется пара-

метром «энергия импульса», так как взаимодействие излучения с материалом происходит только в пределах длительности импульса. Параметр «средняя мощность импульса» есть частное от деления энергии импульса на его длительность $t_{и}$, а параметр «средняя мощность импульсного цикла» - частное от деления энергии импульса на суммарную длительность импульса $t_{и}$ и паузы $t_{п}$, то есть длительность цикла $t_{ц}$ (рис. 7.7).

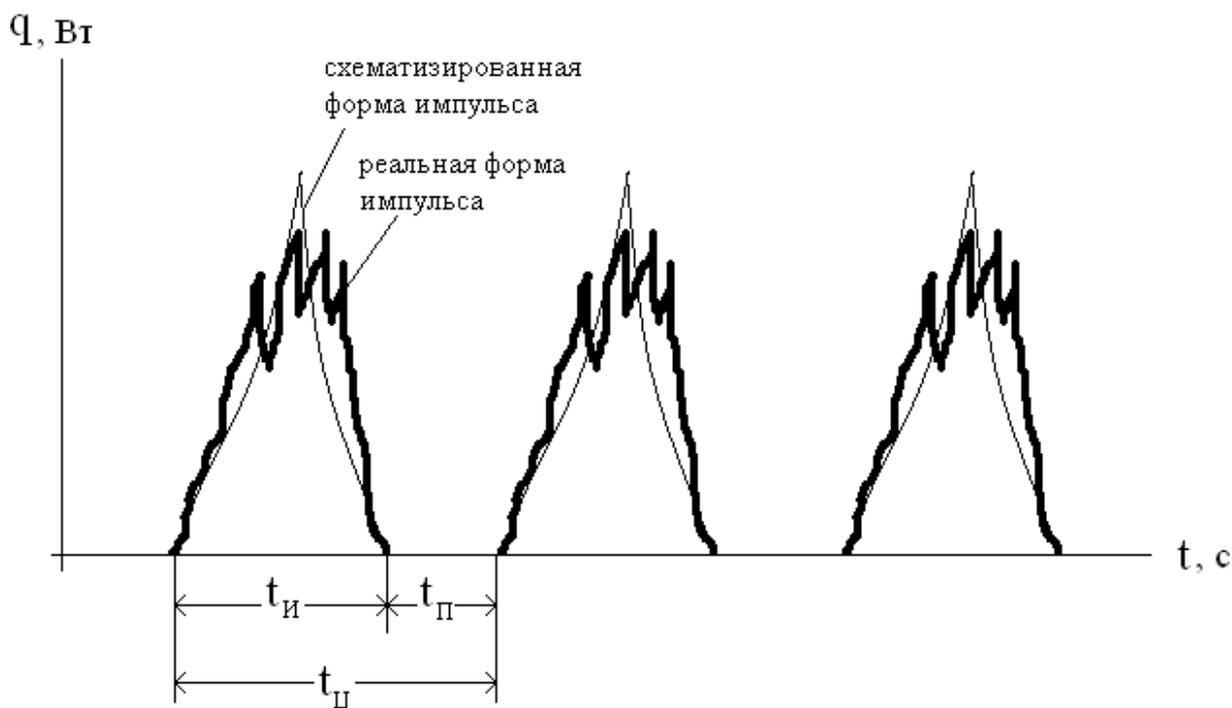


Рис. 7.7

Параметр «координата фокуса» указывает на расположение фокуса F , то есть точки схождения луча после прохождения через линзу, относительно поверхности заготовки. Знак «+» указывает на положение фокуса над поверхностью, а знак «-» на положение под поверхностью (рис. 7.8).

Перемещение фокуса (расфокусировка) наряду с регулированием мощности луча или энергии импульса является средством изменять плотность мощности в пятне нагрева в соответствии с требованиями конкретного способа обработки.

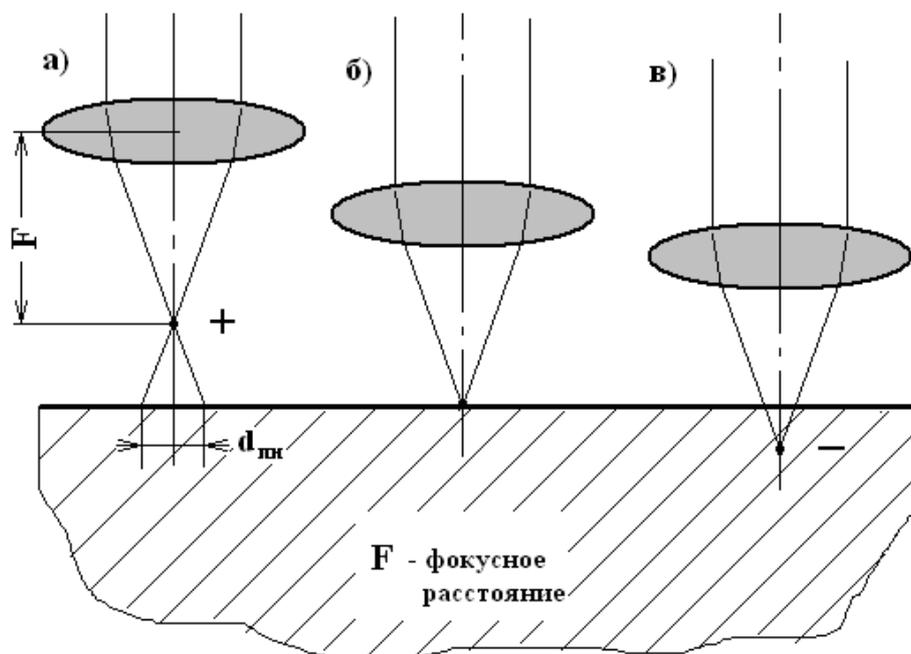


Рис. 7.8

7.6. Лазерная сварка и наплавка

Формирование соединения при *лазерной сварке* основано на общих принципах способа сварки плавлением. В то же время высокая концентрация энергии в месте сварки позволяет существенно снизить массу металла, вовлекаемую в процесс плавления и тем самым снизить расход энергии и увеличить скорость сварки. Одновременно существенно уменьшаются ширина зоны термического влияния и ширина зоны пластических деформаций вблизи сварного шва, что, во-первых, исключает участки с крупным зерном и, во-вторых, сводит к минимуму сварочные деформации и перемещения.

В отличие от дуговых способов при лазерной сварке возможно в значительных пределах перераспределять глубину проплавления основного металла по контуру проплавления: многократно увеличивать её в направлении толщины и уменьшать в направлении ширины – формировать так называемое кинжальное проплавление при сварке сталей до 15 мм толщиной.

Способы транспортировки (подачи) лазерного луча от излучателя до места использования с помощью зеркально-линзовых и волоконно-оптических устройств позволяет выполнять соединения в труднодоступных местах, вблизи от элементов, чувствительных к нагреву, делить луч на несколько частей одинаковой или различной мощности (рис. 7.9). Если соединяемые детали помещены в стеклянный вакуумированный или газонапол-

ненный корпус 2, они могут быть сварены путем введения сфокусированного лазерного луча 3 через стенку корпуса 4 (рис. 7.10).

Сам луч не оказывает на свариваемые заготовки механического воздействия, что существенно облегчает процедуру закрепления заготовок при сварке, особенно заготовок малых размеров и малой массы.

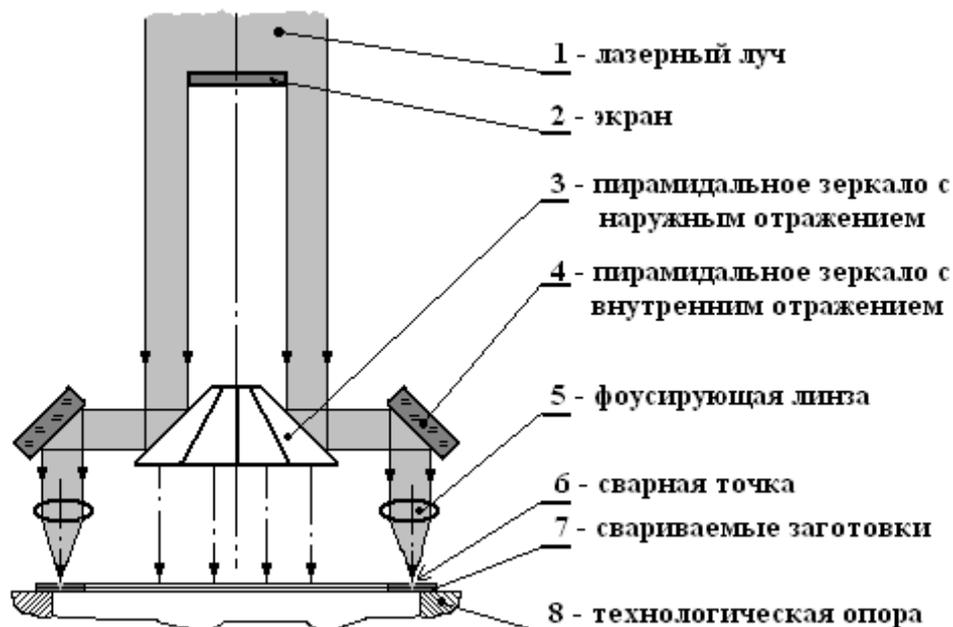


Рис. 7.9

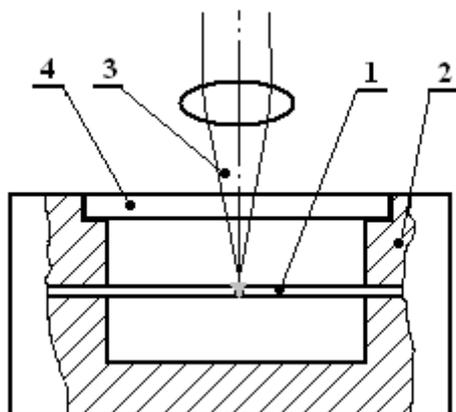


Рис. 7.10

При лазерной сварке возможно выполнение всех типов соединений, характерных для способов сварки плавлением, протяжённых, коротких и точечных. Вместе с тем, большая зависимость степени нагрева места лазерной сварки от точности фокусировки луча, а также, зачастую, малые размеры свариваемых заготовок и сварных соединений *исключают ручной вариант* перемещения пятна нагрева, и лазерная сварка производится

на механизированных и автоматических установках, в той или иной мере специализированных по характеру выполняемых работ.

Лазерная наплавка чаще всего производится с применением наплавляемого материала в виде сухого сыпучего порошка 1 или в виде предварительно нанесённой на поверхность заготовки 2 и высушенной пасты 4 (рис. 7.11, а). При наплавке с использованием сыпучих композиций подача

их производится из бункера 3 (рис. 7.11, б) непосредственно к пятну нагрева. Позициями 5, 6 и 7 на рис. Лтб обозначены соответственно фокусирующая линза, сварочная ванна и наплавленный затвердевший слой.

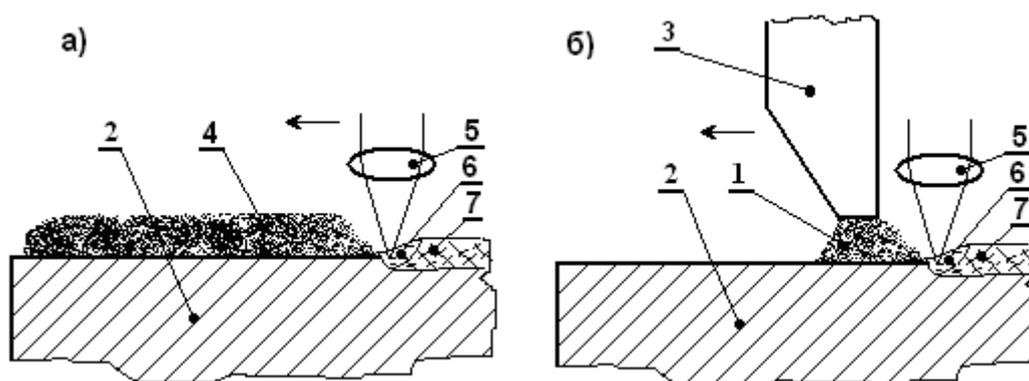


Рис. 7.11

7.8. Лазерная резка и термораскалывание

Лазерная резка материалов – точнее, пробивка отверстий – была исторически первым технологическим использованием лазеров в одно- и многоимпульсном режимах работы без перемещения пятна нагрева. Сочетание пробивки отверстия с перемещением пятна нагрева позволило перейти к собственно резке. Возможности резки возросли, когда были созданы лазеры с непрерывным излучением. В настоящее время применяются процессы лазерной резки как в импульсном режиме, так и в режиме непрерывного излучения, в зависимости от конкретной технологической задачи.

От сварки процесс резки отличается, прежде всего, существенно бóльшей плотностью мощности. Это позволяет не только плавить металл, как это требуется при сварке, но и разрушать его путём испарения и механического воздействия паров на расплав. Кроме того, при резке соосно лучу через специальное сопло пропускается струя газа. Если выбран нейтральный газ, то он продувает образовавшуюся сквозную щель, удаляя из неё расплавленный металл, способствуя стабилизации процесса и образованию поверхностей реза с малой шероховатостью. Для интенсификации процесса резки используют кислород, который не только удаляет расплав из полости реза, но и сжигает металл. Горение металла в глубине полости реза создаёт дополнительный источник тепла, что позволяет резать металл бóльшей толщины.

При резке материалов малой толщины, способных гореть на воздухе, в качестве продувочного применяют нейтральный газ (аргон, азот), подавляющий горение. При резке таких материалов бóльшей толщины возможно при-

менение сжатого воздуха, так как небольшое количество продуктов горения, возникшее в начальный момент, заполняя полость реза, препятствует дальнейшему горению.

В процессе лазерной резки наблюдаются две стадии: первоначальная пробивка сквозного канала при неподвижном пятне нагрева и собственно резка при перемещении пятна нагрева с надлежащей скоростью. При пробивке канала продукты горения и расплав выбрасываются вверх, на лицевую сторону заготовки (рис. 7.12, а), но, как только возникает сквозной канал, они начинают удаляться продувочным газом из полости реза на обратную сторону заготовки (рис. 7.12, б).

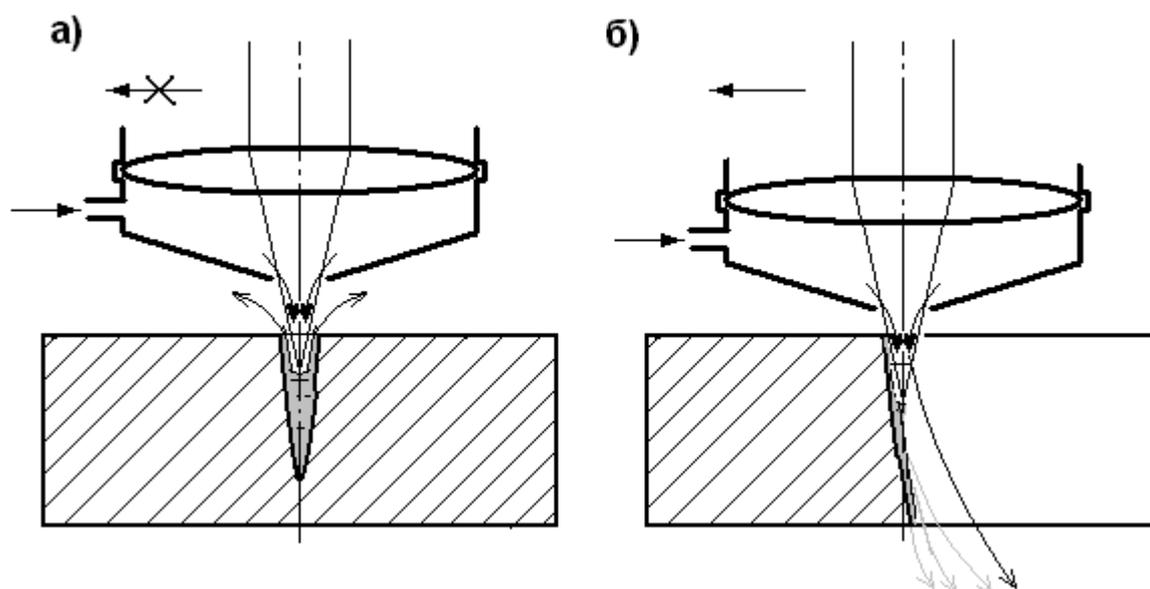


Рис. 7.12

Промышленная лазерная резка, как и сварка, производится только на специальных механизированных и автоматических установках с двухкоординатным перемещением пятна нагрева под управлением компьютерной программы (см. далее).

При выполнении замкнутого контура реза, содержащего криволинейные и прямолинейные участки, находят применение так называемые лазер-прессы. Такое название получили установки, в которых все криволинейные участки прорезаются лазерным лучом на одном конце рабочего стола, а все прямолинейные – одновременно соответствующим количеством вырубных ножей – на другом конце стола, оборудованного прессовым механизмом. Совмещение лазерной резки с механической вырубкой позволяет эффективно использовать достоинства обоих способов и исключить их недостатки. Особенно ощутимый экономический эффект даёт замена дорогого вырубного

штампа со сложной формой режущей кромки на комплект сменных ножей с прямолинейной режущей кромкой.

Лазерное термораскалывание – процесс разделения материала, основанный на управляемом продвижении хрупкой трещины 5, возбуждённой неравномерным лазерным нагревом 2 и последующим быстрым охлаждением 3 (рис. 7.13). Нагретая зона материала испытывает сжимающие нормальные напряжения. При подаче через трубку 4 охлаждающего газа в пятне 3 сжимающие напряжения сменяются растягивающими, вследствие чего возникает трещина в пределах зоны охлаждения.

По мере одновременного синхронного передвижения пятен нагрева и охлаждения подрастает и трещина. Другими словами, трещина следует за пятном нагрева. Управляя движением пятна нагрева, управляют и ростом трещины.

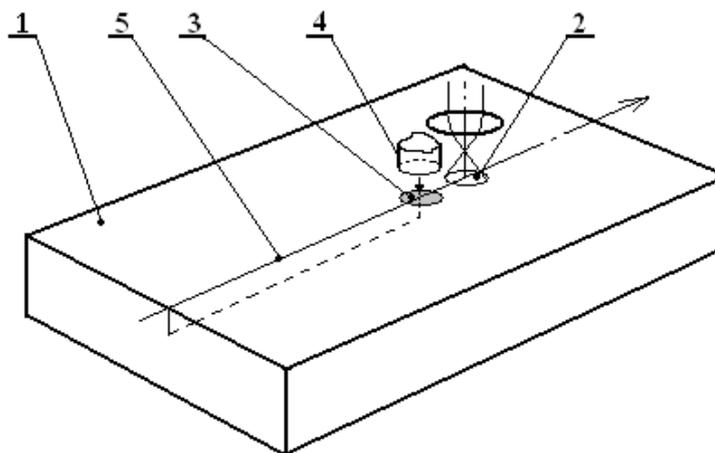


Рис. 7.13

Из сути механизма этого процесса следует, что термораскалывание применимо к хрупким, главным образом, аморфным материалам: силикатному и кварцевому стеклам, керамикам и др. Все эти материалы можно резать и по ранее рассмотренному механизму, то есть с плавлением и испарением, но термораскалывание – процесс быстрый, безотходный, обеспечивающий высокое качество поверхности реза.

В технологии термораскалывания важными параметрами являются плотность мощности и коэффициент поглощения излучения, который является функцией природы материала и частоты излучения.

7.8. Лазерная поверхностная термообработка (ЛПТ)

Как всякий способ нагрева, лазерный нагрев «обречён» на применение для термообработки. Особенности источника тепла, создаваемого лазерным лучом, рассмотренные ранее, определяют его применение для поверхностной термообработки. Размеры пятна нагрева $d_{\text{лн}}$ в некоторых пределах можно регулировать той или иной степенью расфокусировки (рис. 7.8, а).

Перемещением пятна нагрева по одной или двум координатам последовательно производят нагрев участка поверхности необходимых размеров и

конфигурации. В зависимости от величины коэффициента поглощения и теплопроводности материала заготовки достигается та или иная глубина прогрева. Как правило, эта глубина не превышает 1 мм.

Основные виды термообработки – закалка, отжиг и отпуск – различаются, как известно, максимальной температурой нагрева и скоростью охлаждения. *Закалка и отжиг* характерны нагревом до температур начала аустенитного превращения (в сталях). При *отпуске* максимальная температура нагрева назначается ниже начала аустенитного превращения.

При ЛПТ температура нагрева задаётся степенью расфокусировки и длительностью импульса (при импульсном режиме работы излучателя) или скоростью перемещения пятна нагрева (при непрерывном режиме). Охлаждение производится чаще всего за счёт отвода тепла в массу заготовки и скорость охлаждения, следовательно, зависит от теплопроводности материала заготовки. Относительно редко для охлаждения используют обдув струёй газа или струю воды.

В отличие от других способов поверхностной термообработки – токами высокой частоты (ТВЧ), газопламенной – лазерный способ позволяет производить её в точно назначенных, труднодоступных и стеснённых местах и с наименьшим расходом энергии. Чаще всего лазерным способом производится поверхностная закалка. Практика ЛПТ и эксплуатации термообработанных деталей показала, что во многих случаях можно ограничиться не сплошной, а «пятнистой» или «полосовой» (рис. 7.14).

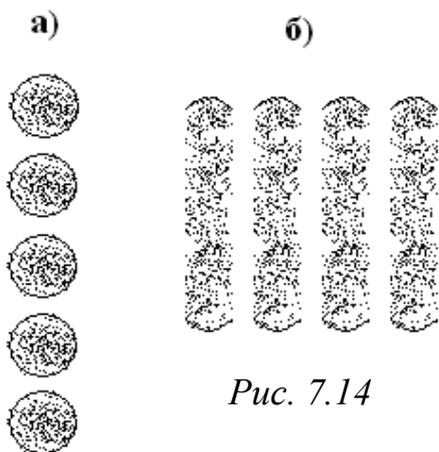


Рис. 7.14

Важной особенностью ЛПТ является возможность вести её с подплавлением, что приводит к образованию из тонкого расплавленного слоя столбчатых кристаллов, нормальных к поверхности и обладающих повышенной твёрдостью. ЛПТ вообще при прочих равных условиях обеспечивает повышение твёрдости закалённого слоя в сравнении с другими способами.

Лазерная поверхностная термообработка – единственный способ, который может быть заключительной операцией в процессе изготовления детали.

7.9. Лазерное гравирование

Под лазерным гравированием понимают нанесение на поверхность деталей различной знаковой и образной информации. В физическом смысле лазерное гравирование – это местное испарение материала или его подплавление. Лазерная маркировка отличается чёткостью и долговечностью. Она производится на оборудовании, аналогичном оборудованию для резки.

7.10. Лазер как техническое устройство

Как техническое устройство лазер содержит все те элементы, которые указаны на рис. 7.4, но в таком конструктивном исполнении, которое позволяет его практическое использование. Кроме того, в состав лазера входят различные механизмы, приборы и системы, обеспечивающую его нормальную работу в процессе эксплуатации. Комплект и конструктивное их исполнение, прежде всего, определяются видом, мощностью и назначением лазера и отличаются сугубой конкретностью.

В качестве конкретного примера рассмотрим лазер ЛТН-103. Лазер ЛТН-103 является твёрдотельным лазером непрерывного действия. В его состав входят (рис. 7.15) излучатель 1, блок питания 2, на передней стенке которого размещаются пульт управления, стартёр 3, насосная установка системы охлаждения 4, кабели и шланги, соединяющие отдельные составные части между собой и с внешними источниками энергии и водооборота; блок питания 2, аппаратура блока управления, насосы системы охлаждения и ёмкости с запасом охлаждающей дистиллированной воды в совокупности называются системой питания и контроля (СПИК) и размещены в общем корпусе 5.

В излучателе 1, как уже отмечалось, генерируется лазерное излучение и из его фотонов формируется лазерный луч. Блок питания 2 предназначен для поддержания дуговых разрядов в лампах накачки. Стартёр предназначен для первоначального электрического пробоя дуговых промежутков в лампах накачки при запуске лазера; он выполнен в виде колебательного контура (рис. 7.16) с разрядником 1, то есть двумя электродами, разведёнными между собой на некоторое регулируемое расстояние (разрядный промежуток). Как известно, колебательный контур содержит последовательно соединённые электрический конденсатор 2 и катушку индуктивности. Роль катушки выполняет вторичная повышающая обмотка импульсного трансформатора 3.

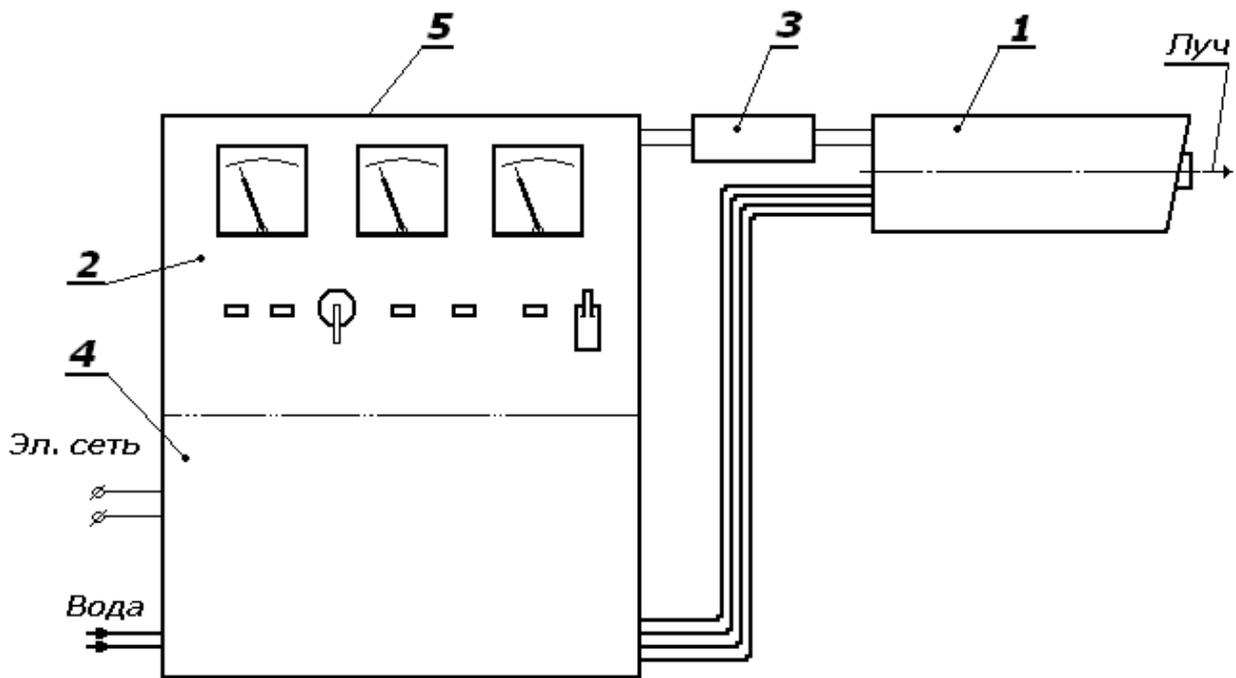


Рис. 7.15

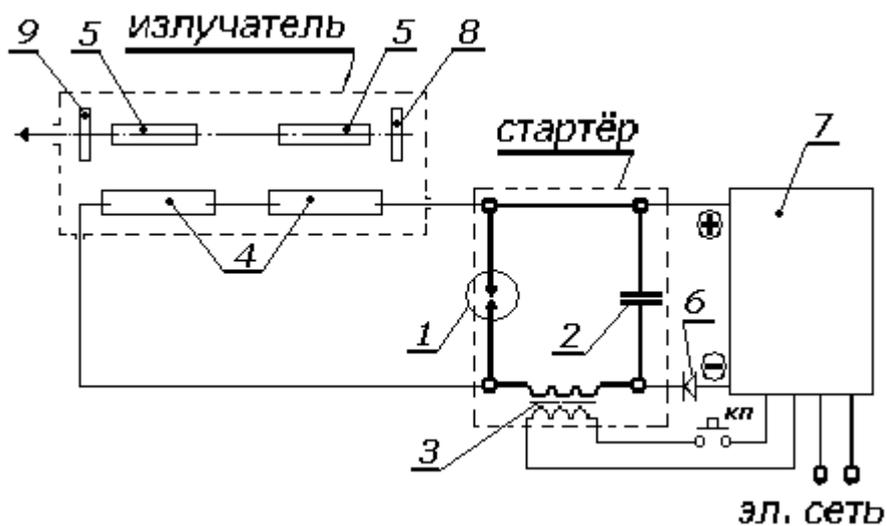


Рис. 7.16

Насосная установка 4 системы охлаждения выполнена по двухконтурной схеме. В первом замкнутом контуре циркулирует дистиллированная вода, охлаждающая дуговые лампы накачки в *квантронах*. Во втором открытом контуре циркулирует водопроводная вода, охлаждающая ёмкости с дистиллированной водой.

Излучатель лазера ЛТН-103

Излучатель лазера ЛТН-103 (рис. 7.17) имеет коробчатый жёсткий литой корпус 1, внутри которого установлены два *квантрона* 2, закрепленные на подставках 3 пластинчатыми пружинными хомутами 4. К ниппелям 5 квантронов присоединены шланги 11, выведенные из корпуса излучателя к насосным станциям. К выступающим контактным втулкам дуговых ламп присоединён питающий кабель 12, выведенный из корпуса излучателя к источнику тока. Полупрозрачное 6 и непрозрачное 7 зеркала оптического резонатора закреплены в торцах корпуса излучателя 1. Во входной втулке полупрозрачного зеркала 6 имеется паз, в который входит заслонка затвора 8. Движение заслонки производится соленоидом и пружиной. К обойме непрозрачного зеркала 7 с наружной стороны корпуса излучателя прикреплен фотоэлектрический датчик 9 мощности лазерного луча. На всём пути внутри корпуса излучателя лазерный луч ограждён стеклянными трубками 10. Это сделано для безопасности оператора и чтобы на полированных торцах активных элементов не оседала пыль. Для доступа к внутренней полости корпуса излучателя он снабжён двумя боковыми съёмными крышками.

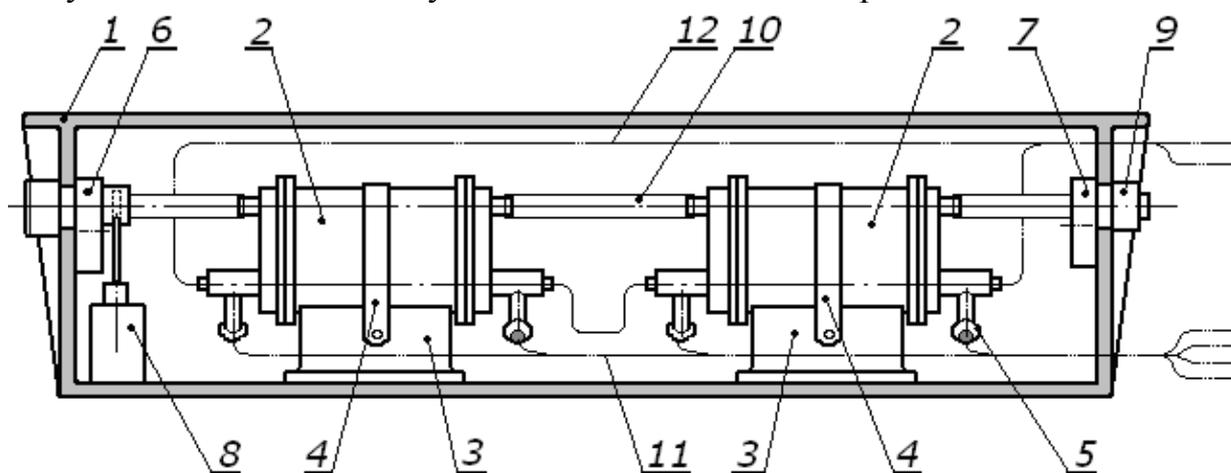


Рис. 7.17

Квантрон: конструкция и действие в составе излучателя

Квантроном назван прибор (рис. 7.18), в котором в жёстком неизменном относительном положении закреплены три важнейших элемента лазера: активный элемент 1 в виде искусственно выращенного кристалла алюмоиттриевого граната цилиндрической формы, стержнеобразная дуговая лампа накачки 2 и отражатель 3 в виде цилиндра эллипсоидного сечения из кварцевого стекла с отполированной и посеребренной наружной поверхностью.

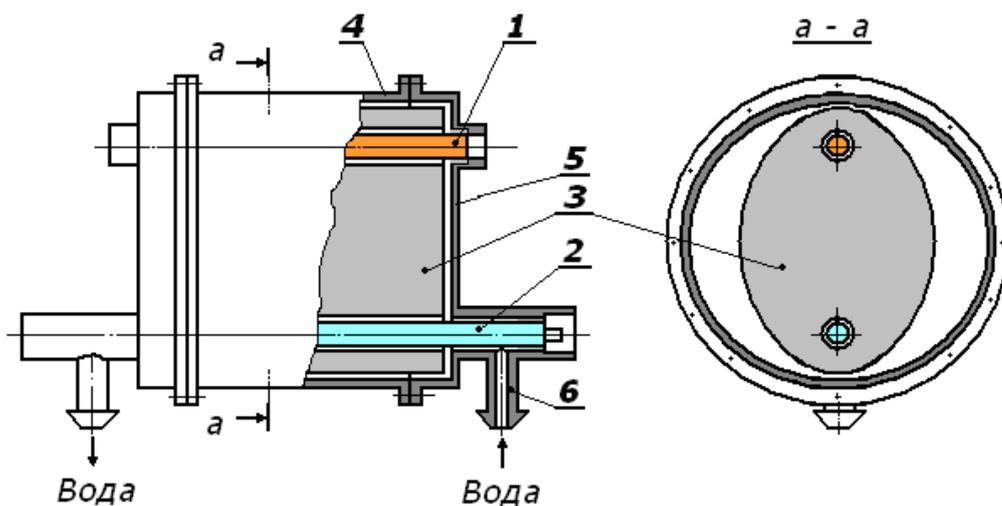


Рис. 7.18

В алюмо-иттриевом гранате, из которого изготовлен активный элемент, генерируется невидимое инфракрасное излучение с длиной волны 1,064 мкм. При эксплуатации лазера для обнаружения излучения применяют в качестве индикатора спрессованные соли кальция в кольцевой оправе, которые под действием инфракрасного излучения светятся зелёным цветом. Сам активный элемент выполнен в виде кругового цилиндра диаметром 6 мм и длиной 100 мм с параллельными полированными торцами.

Дуговая лампа накачки выполнена в виде трубки из кварцевого стекла длиной 165 мм диаметром около 6 мм с вваренными по торцам вольфрамовыми электродами и наполнена криптоном.

Активный элемент и лампа располагаются параллельно в каналах отражателя (рис. 7.18). Цилиндро-эллиптическая форма отражающей поверхности и расположение активного элемента и лампы накачки в каналах, оси которых совпадают с полюсами эллиптического сечения, обеспечивает равномерное освещение активного элемента (рис. 7.19).

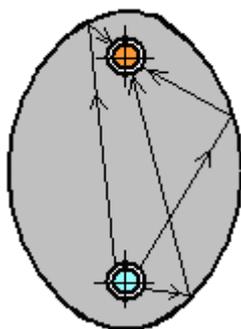


Рис. 7.19

Взаимное закрепление частей квантрона производится в разъёмном корпусе 4-5 таким образом, чтобы обеспечить герметичность, так как по зазорам между деталями квантрона прокачивается охлаждающая дистиллированная вода. Вода подводится и выводится через ниппели 6.

В излучателе ЛТН-103 (рис. 7.17) на общей оптической оси установлены два квантрона, которые не только генерируют лазерное излучение, но и взаимно его усиливают. Лампы накачки квантронов соединены последовательно. Это обеспечивает их одновременное «зажигание».

Система охлаждения (рис. 7.20) каждого квантрона 3 автономна со своим насосом 2 и баком охлаждающей воды 1, что обеспечивает одинаковую интенсивность охлаждения. Дистиллированная вода в баке 1 охлаждается змеевиком 4, по которому циркулирует водопроводная вода.

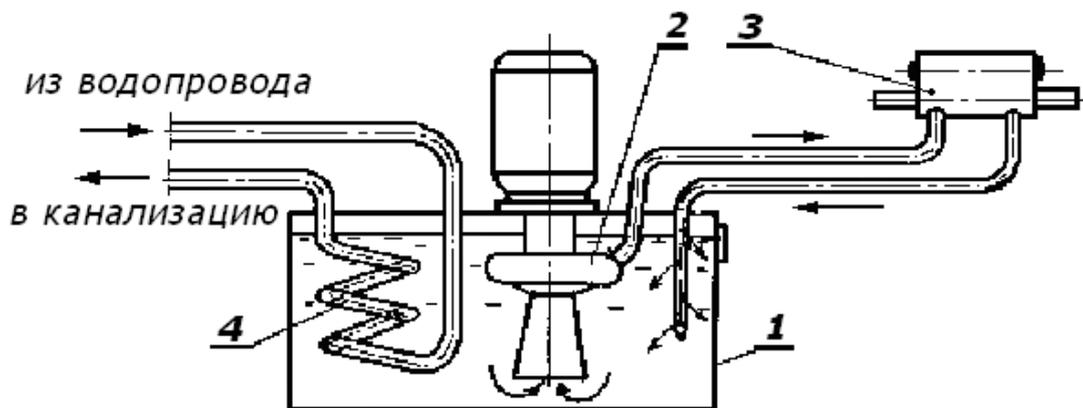


Рис. 7.20

Оптический резонатор

Оптический резонатор, как уже отмечалось, состоит из двух зеркал 6 и 7 (рис. 7.17), которые выполнены в виде стеклянных дисков со специальным напылением, отражающим инфракрасное излучение. Коэффициент отражения полупрозрачного зеркала 6 равен 24%, а коэффициент отражения непрозрачного зеркала 7 равен 97%. 3% текущей величины мощности лазерного луча, падающие на чувствительный элемент фотоэлектрического датчика 9, после преобразования в электрический ток воспринимаются прибором на пульте управления. По мере износа напыления на поверхности зеркал их поворачивают на некоторый угол вокруг оси.

Коллиматор (поз. 9 на рис. 7.5) представляет из себя двухлинзовый оптический прибор в трубчатом корпусе. Он устанавливается по оси луча непосредственно за выходным зеркалом и перед входом в фокусирующую систему. Коллиматор увеличивает диаметр лазерного луча с 4 до 8 мм и одновременно уменьшает расходимость луча. Эти свойства коллиматора улучшают качество фокусировки луча на поверхности обрабатываемого изделия.

Дополнительное оснащение лазера ЛТН-103 при использовании в технологических установках

Одним из важных свойств технологического лазера состоит в том, что его конструкция не зависит от области применения. Конкретное применение достигается главным образом изменением режима работы и оснащением не-

которым дополнительным оборудованием, прежде всего, – фокусирующей линзовой или зеркальной оптикой. В качестве примера можно привести оснащение лазера резаком для тепловой и газолазерной резки материалов (рис. 7.21).

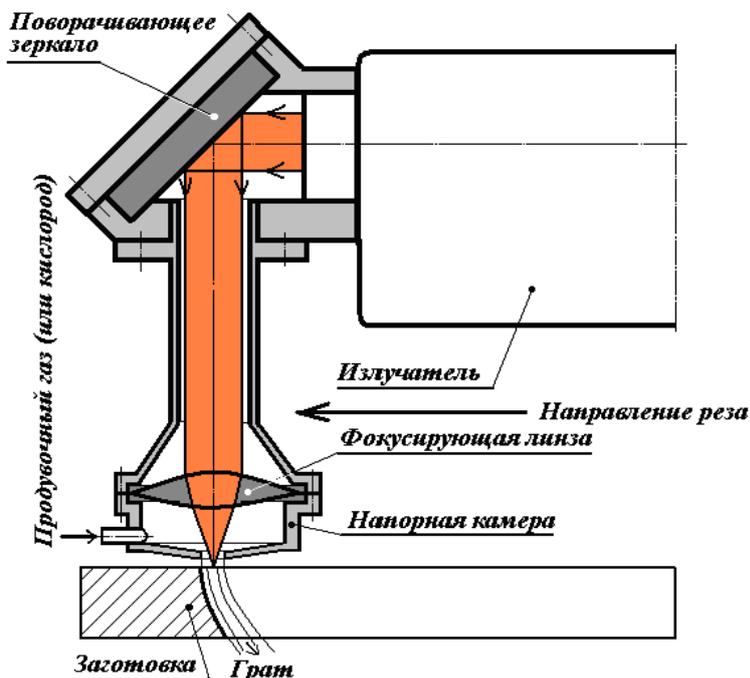


Рис. 7.21

Основные детали резака – поворачивающееся зеркало, фокусирующая линза и напорная камера, через которую подаётся продувочный газ. При резке сталей в качестве продувочного газа применяют кислород, что существенно увеличивает производительность резки.

Как правило, установка для лазерной обработки оснащается механизмом для перемещения либо одного резака, либо резака совместно с излучателем, либо обрабатываемой заготовкой.

Контрольные вопросы

1. Что такое лазерное излучение ?
2. Основные свойства лазерного излучения.
3. Как проявляется монохроматичность лазерного излучения?
4. Отношение лазерного излучения к законам оптики.
5. Что такое когерентность лазерного излучения?
6. Как проявляется направленность лазерного излучения?
7. Возбуждение электронов как следствие энергетической накачки вещества.

8. Что такое инверсная заселённость энергетического уровня электрона?
9. Причина генерации монохроматического излучения.
10. Причина генерации полихроматического излучения.
11. Какие вещества принято называть лазерными?
12. Что такое активный элемент лазера?
13. Составные части твёрдотельного лазера и их функции в процессе генерации лазерного излучения.
14. Взаимодействие активного элемента и лампы накачки.
15. Роль оптического резонатора в работе излучателя. Как формируется лазерный луч.
16. Каковы свойства лазерного излучения и как используются для его практического применения?
17. Классификация лазеров по основным существенным отличительным признакам.
18. Какие лазеры относятся к технологическим?
19. Состав лазера как технического устройства.
20. Основные и вспомогательные элементы твёрдотельного лазера.
21. Конструкция (устройство) излучателя.
22. Принцип действия стартера.
23. Определение и конструкция квантрона.
24. Назначение, схема и действие автономной системы охлаждения.

Рекомендуемая литература

1. Черкасов, В.К. Концепции современных технологий: учебное пособие / В.К.Черкасов, Н.А.Сигов.– Вологда: ВоГТУ, 2005. – 100 с.
2. Григорьянц, А.Г. Основы лазерной обработки материалов / А.Г. Григорьянц. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.: ил.
3. Лазеры [электронный ресурс] – режим доступа http://www.laser-reserv.ru/pub/lazernyetehnologii/lazernaya_obrabotka/

8. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ОБРАБОТКА

8.1. Сущность электронно-лучевой обработки материалов

Электронно-лучевая обработка материалов (ЭЛО), как и лазерная, относится к лучевым способам. В отличие от лазерного луча, являющегося направленным потоком фотонов, электронный луч представляет собой направленный поток ускоренных электронов. Таким образом, при ЭЛО носителем энергии являются не фотоны, а электроны. Источником электронов выступает разогретый катод обычно в виде раскалённой вольфрамовой или танталовой нити, из которой выбрасываются (эмитируют) электроны.

Специальным устройством (электронной пушкой) из облака эмитированных электронов формируется направленный поток (луч). Электронная пушка не только генерирует электроны и формирует из них луч, но и фокусирует луч в заданной точке на оси луча. Источником тепла при ЭЛО является пятно нагрева в том месте на поверхности заготовки, куда падает электронный луч. Запас энергии электрона, помимо степени его возбуждения, определяется скоростью его полёта от катода к аноду, которая зависит от разности потенциалов (анодного или разгонного напряжения U_p). При этом приобретённая электронами кинетическая энергия позволяет им достичь поверхности обрабатываемой заготовки.

При относительно малой величине разгонного напряжения электроны отдают свою энергию в тонком поверхностном слое обрабатываемого материала. Возникающее при этом тепло распространяется вглубь материала в меру его теплопроводности по схеме точечного или плоского источника. Изотермические поверхности при этом имеют полусферическую форму. При большом разгонном напряжении электроны проникают на значительную глубину, где и отдают энергию атомам материала, и распространение тепла происходит по схеме линейного источника с цилиндрической формой изотермических поверхностей.

Для увеличения длины свободного пробега электронов вся процедура производится в вакуумной камере. В зависимости от конструкции электронной пушки обрабатываемое изделие либо является анодом, либо заземляется. При столкновении электрона с поверхностью заготовки его суммарная энергия частично преобразуется в тепловую форму, частично – в тормозное (рентгеновское) излучение. Жёсткость рентгеновского излучения примерно пропорциональна величине U_p . При ЭЛО используется тепловая составляющая, а рентгеновское излучение поглощается материалом вакуумной камеры.

8.2. Пост электронно-лучевой обработки

Пост электронно-лучевой обработки составляют взаимосвязанные функциональные блоки – установку для электронно –лучевой обработки.

На рис. 8.1 приведена конструктивно-функциональная схема такой установки.

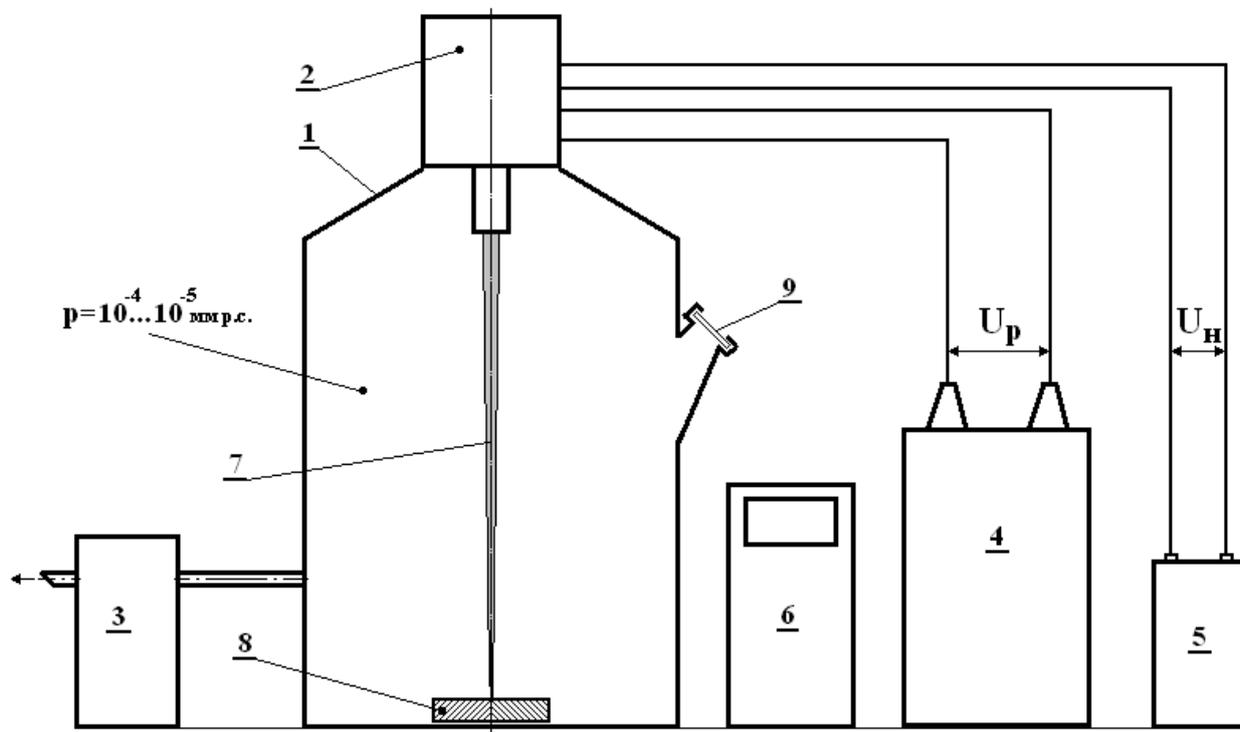


Рис. 8.1

К вакуумной камере 1 герметично присоединена электронная пушка 2. К электронной пушке подаётся напряжение накала U_H от источника 5 и разгонное напряжение U_p от источника 4. С помощью вакуумного насоса 3 в камере создаётся разрежение в пределах $10^{-4} \dots 10^{-5}$ мм ртутного столба. Генерируемый в электронной пушке электронный луч 7 направляется на обрабатываемую заготовку 8. Наблюдение за процессом обработки ведётся через герметичный иллюминатор 9, а управление установкой – с пульта 6.

На схеме не приведены другие важные компоненты установки: люк для загрузки и выгрузки обрабатываемых заготовок, механизм перемещения заготовок, система водяного охлаждения электронной пушки и др. По конструкции и размерам установки для ЭЛО весьма разнообразны в зависимости от мощности и характеристик обрабатываемых заготовок.

8.3. Элементы технологии и области применения ЭЛО

В сравнении с ранее рассмотренной лазерной обработкой материалов у ЭЛО с ней есть много сходного, что диктуется сходными энергетическими характеристиками: высокой плотностью мощности, малыми размерами пятна нагрева. Оба способа позволяют регулировать мощность в широких пределах, как за счёт подводимой энергии, так и за счёт степени расфокусировки луча. Оба способа позволяют выполнять сходные операции: сварку, резку, размерную обработку, термообработку. Оба способа автономны относительно обрабатываемой заготовки. Оба способа в силу весьма малых остаточных перемещений и деформаций могут быть заключительными операциями в технологическом маршруте изготовления деталей.

Вместе с тем, разная природа носителей энергии проявляется в некоторых существенных различиях, как в процессах, так и в областях применения:

- процесс ЭЛО идёт с большим КПД (десятки %);
- процессу ЛО присущ в большинстве случаев КПД, исчисляемый в единицах %;
- лазерный луч можно транспортировать на значительные расстояния от места генерации к месту использования в обычной атмосфере без заметных энергетических потерь;
- применение электронного луча требует создания вакуума на участке от электронной пушки до места применения, то есть технология ЭЛО сопряжена с применением вакуумных камер;
- электронно-лучевым способом можно производить сварку более толстого металла, что позволяет применять его, например, при сварке частей ротора газовых турбин.

На рис. 8.2 приведены примеры сварных соединений, выполняемых электронно-лучевым способом. Следует обратить внимание на особенности в подготовке кромок соединяемых заготовок (б, в, г, д, е). Это связано с отсутствием присадочного материала. Высокая проникающая способность электронов позволяет применять уникальные виды соединений – последовательные через стенку (ж, и).

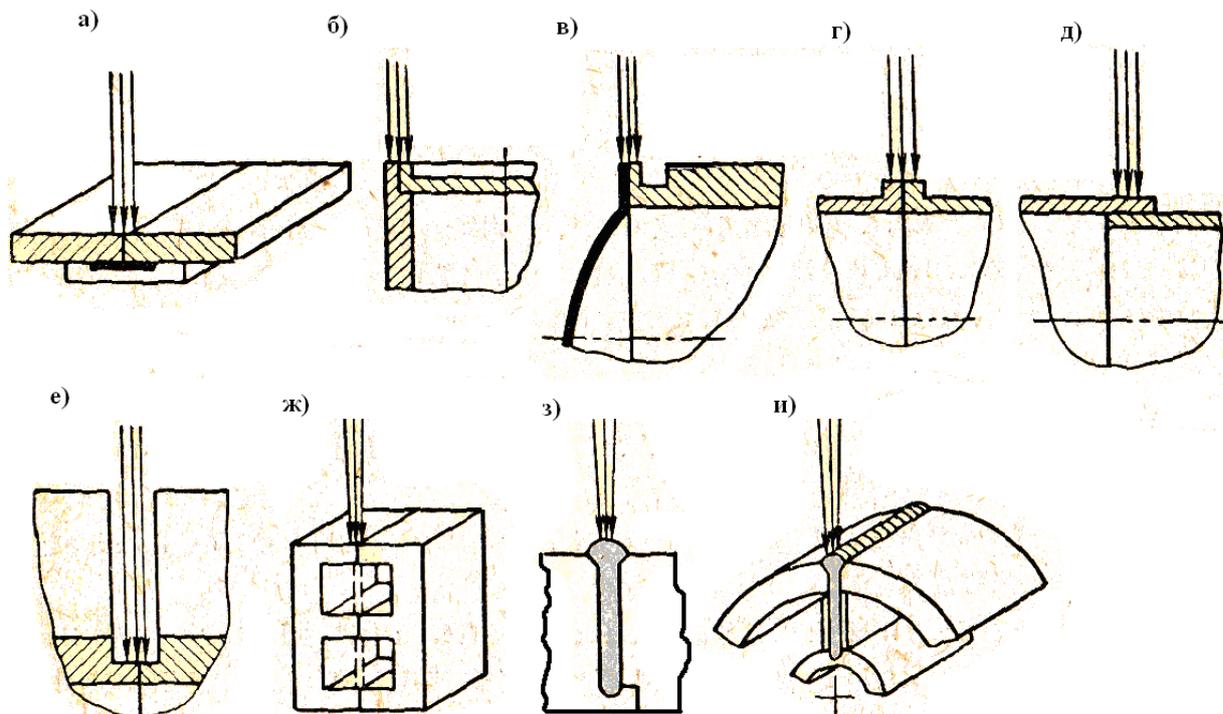


Рис. 8.2 [2]

Контрольные вопросы

1. Что является носителем энергии при ЭЛО?
2. Особенности взаимодействия электронного луча с материалом в зависимости от плотности мощности.
3. Условия применения ЭЛО.
4. Состав установки для ЭЛ-сварки
5. Виды сварных соединений, выполняемых ЭЛ способом.
6. Место ЭЛО в технологическом маршруте.
7. Области применения ЭЛО.

Рекомендуемая литература

1. Черкасов, В.К. Концепции современных технологий: учебное пособие / В.К.Черкасов, Н.А.Сигов.– Вологда: ВоГТУ, 2005. – 100 с.
2. Назаренко, О.К. Электронно-лучевая сварка / О.К. Назаренко, Е.И. Истомина, В.Е. Локшин.– М.: Машиностроение, 1966. – 128 с.
3. Электронно-лучевая обработка [электронный ресурс] – режим доступа <http://xreferat.ru/76/606-1-luchevye-metody-obrabotki-materialov.html>
4. Электронно-лучевая обработка [электронный ресурс] – режим доступа <http://weldzone.info/technology/ets/899-elektronno-luchevaya-svarka>

9. ТЕРМИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ

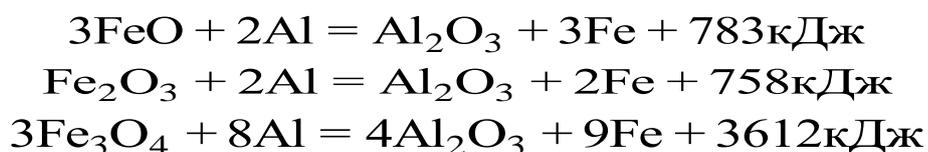
9.1. Сущность термитного процесса

Саму возможность получения металлов и сплавов термитным способом, то есть восстановлением оксидов одних веществ окислением других чистых веществ открыл известный русский физико-химик Н.Н. Бекетов в период 1859...1865 г.г. При термитном процессе чистое вещество сжигается кислородом, содержащемся в оксиде другого вещества, а не кислородом воздуха. Горючими могут быть вещества с большой теплотой образования оксидов (алюминий, магний, кремний). Источником кислорода в термитных смесях служат оксиды металлов с относительно небольшой теплотой образования (оксиды железа, марганца, никеля, меди и др.).

При термитном процессе в качестве источника тепла, оплавляющего кромки соединяемых заготовок или просто создающих расплав, применяется экзотермическая реакция восстановления оксидов металлов другим, чистым металлом, происходящей в порошкообразной их смеси под названием термит.

Чаще всего применяются алюминиевые термиты, состоящие из железной окалины и металлического алюминия. Оба компонента подготавливаются в зернистой форме с величиной зерна около 1мм.

Горение смеси после её местного подогрева примерно до 1000 °С происходит весьма интенсивно в течение 20...30 с по одной из реакций в зависимости от химического состава окалины [2]:



При сгорании алюминиевого термита развивается температура до 3000°С и продукты реакции – железо с температурой плавления около 1500°С и оксид алюминия с температурой плавления 2050°С – получают не только в расплавленном, но и в сильно перегретом состоянии.

Процесс термитной сварки впервые осуществил в 1898 г. германский химик Г. Гольдшмидт [2]. Основоположником развития термитной сварки в СССР является инженер М.А. Карасёв, который, начиная с 1922 г., внедрил её вначале на железнодорожном транспорте для сварки рельс.

Существенны три особенности термитного процесса:

- возможность получения сплавов различного состава путём введения в исходную рецептуру смеси не только оксидов, но и чистых элементов;
- получение жидкого сплава с высокой степенью перегрева против его

температуры плавления;

- высокая скорость протекания процесса.

Полученную после термитной реакции массу жидкого сплава можно использовать различными способами: в качестве источника тепла, в качестве материала для формирования изделия (термитного литья) и комбинированно.

Промышленное применение получили:

- способ сварки плавлением, при которой жидкий сплав, заливаемый между кромками соединяемых заготовок, играет роль сварочной ванны;
- способ сварки давлением, при котором жидкий термитный сплав только нагревает соединяемые кромки, а затем вытесняется в процессе сдавливания (осадки) заготовок;
- способ термитного литья, при котором полученный после термитной реакции сплав заливают в форму, полученную любым известным способом.

9.2. Технология термитной сварки

На рис. 9.1 приведена поэтапная схема термитной сварки плавлением.

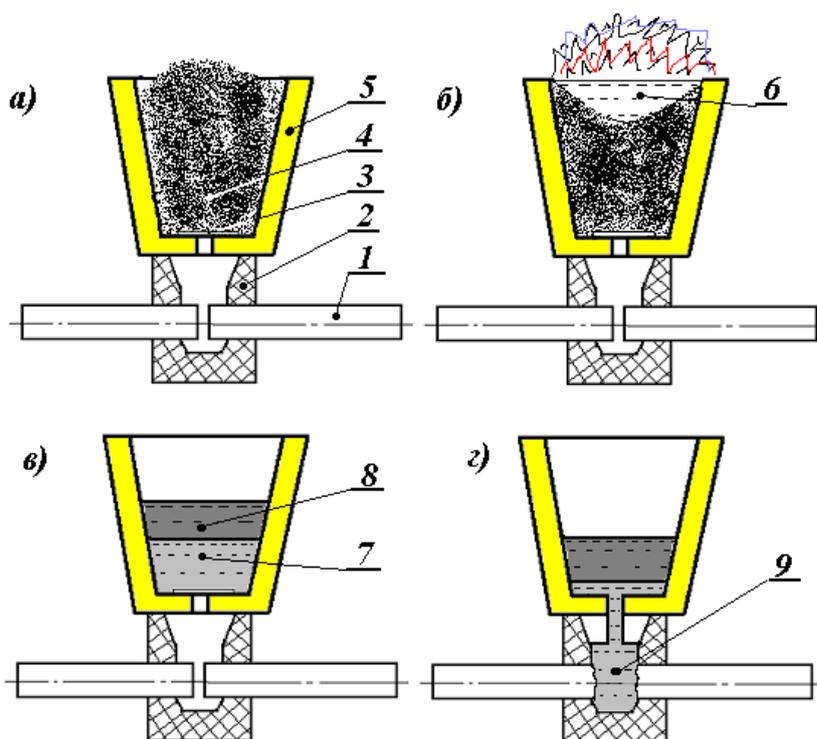


Рис. 9.1. Стадии процесса термитной сварки плавлением

В исходном состоянии (рис. 9.1, а) кромки соединяемых заготовок 1 помещают в кокиль 2 разовой из огнеупорной массы или разъёмный табельный из меди. На верхнюю кромку кокиля устанавливают тигель 5, заполненный сыпучей термитной смесью 4. Дно тигля имеет отверстие, закрытое металлической диафрагмой 3.

Специальной высокотемпературной спичкой или дуговым разрядом термитную смесь на поверхности засыпки нагревают до температуры самоподдерживающейся реакции («зажигают», рис. 9.1, б). Вначале расплав представляет из себя жидкую смесь 6 продуктов реакции. По завершении реакции (рис. 9.1, в) расплав чётко расслаивается: внизу располагается жидкий сплав 7, сверху – жидкий шлак 8. Жидкий металл проплавляет диафрагму и сливается в кокиль 2 (рис. 9.1, г). Объём кокиля рассчитан на приём всего расплава, так что тигель полностью освобождается. Кроме того, масса заливаемого металла должна обеспечить формирование усадочной раковины за пределами места сварки.

Поскольку заливаемый металл сильно перегрет, то он оплавляет концы заформованных в кокиль заготовок 1, и после застывания расплава образуется неразъёмное сварное соединение 9. По схеме сварки плавлением на этом процесс заканчивается. После полного остывания места сварки кокиль снимают и механическим путём удаляют шлак и избытки металла.

Подобным же образом осуществляется *термитное литьё*, при котором кокиль 2 представляет собой литейную форму, а тигель 5 выполняет роль плавильной печи.

Важными технологическими достоинствами термитного процесса являются его независимость от постороннего источника энергии, простота оборудования и высокая скорость.

В некоторых случаях, например, при сварке проводов высоковольтных линий электрических передач, термитная масса прессуется в виде обойм, надеваемых на концы соединяемых проводов.

Контрольные вопросы

1. Сущность термитного процесса.
2. Условия осуществления термитного процесса
3. Формирование химического состава металла при термитном процессе.
4. Техника и области применения термитного процесса.

Рекомендуемая литература

1. Черкасов, В.К. Концепции современных технологий: учебное пособие / В.К. Черкасов, Н.А. Сигов. – Вологда: ВоГТУ, 2005. – 100 с.
2. Малкин Б. В. Термитная сварка / Б.В. Малкин, А.А. Воробьёв. – М.: Министерство жилищно-коммунального хозяйства РСФСР, 1963. – 104 с.
3. Электронно-лучевая обработка [электронный ресурс] – режим доступа <http://forca.ru/knigi/arhivy/prokladka-provodov-i-kabeley-11.html>

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учебное пособие представляет собой конспективный обзор сущности и областей применения некоторых способов обработки конструкционных материалов при изготовлении деталей машин и сооружений, традиционно подпадающих, фигурально выражаясь, под юрисдикцию сварочного производства. Некоторые способы – склеивание металлов, комбинированные процессы, сварко-пайка, гидроабразивная резка и др., а также разновидности рассмотренных способов – в пособии не упомянуты.

Первая методическая задача пособия состоит в достаточно популярном, но не упрощенном, разъяснении приложения физических и химических закономерностей, названных воздействиями, к конкретным материалам в производственных условиях.

Вторая задача состоит в том, чтобы донести до учащегося необходимость взаимосвязанного анализа свойств обрабатываемого материала и технологических свойств и возможностей способов обработки.

Третья задача, которая всегда ставится в учебной литературе, – разъяснение специальной терминологии сварочного производства.

Более глубокое, при необходимости, изучение процессов сварочного производства потребует привлечения дополнительной литературы и не только из списка рекомендуемой.

Учебное издание

Владимир Константинович Черкасов

**НЕДУГОВЫЕ СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ
В СВАРОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**

Учебное пособие

Редактор И.Т. Куликова

Подписано в печать 06.03.2014 г.
Формат 60х90/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 5,2.
Тираж экз. Заказ .

Отпечатано: РИО ВоГТУ
160000, г. Вологда, ул. Ленина, 15.