Раздел 4. Сварка и пайка металлов

Глава 22. Физико-химические основы образования сварного соединения

22.1. Образование сварного соединения. Определение сварки

Сварочный процесс, как и пайка, направлен на получение монолитного соединения, которое возникает в случае установления связей между атомами свариваемых деталей на границе их раздела, аналогично связям, действующим в твердом теле.

В зависимости от основных признаков, которые в данном определении превалируют, понятия сварки могут быть различные. Например, сварка определяется как процесс получения неразъемных соединений посредством установления межатомных связей между соединяемыми частями при их нагревании и (или) пластическом деформировании. В данном определении указывается и на физическую сущность процесса, и на технологические принципы его реализации.

Наиболее общим определением процесса сварки является ссылка на его термодинамическую сущность: сварка — это процесс получения монолитного соединения материалов за счет термодинамически необратимого превращения тепловой и механической энергии и вещества в стыке.

Процесс сварки включает две стадии: образование физического контакта между соединяемыми деталями и возникновение электронного взаимодействия между их поверхностями. Далее происходит развитие диффузионных процессов.

В идеальном случае сварка должна происходить после того, как соединяемые поверхности сблизились на межатомные расстояния. На рис. 22.1 показано, каким образом изменяются межатомные силы взаимодействия (притяжения и отталкивания), а также потенциальная энергия по мере сближения атомов. Как видно, на первой стадии сближения силы притяжения $P_{пр}$ больше сил отталкивания $P_{от}$ (рис. 22.1, *а)*.

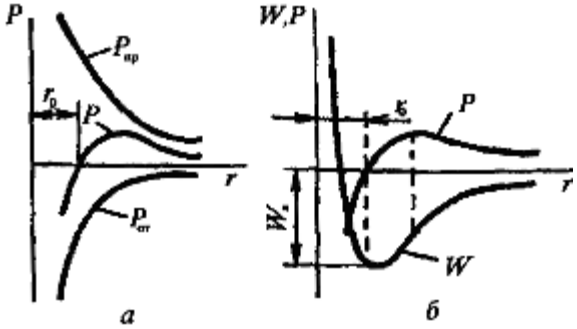

Рис. 22.1. Характер изменения сил взаимодействия (а) и потенциальной энергии (б) при сближении атомов

Затем начинается процесс взаимного перекрытия электронных оболочек атомов и наблюдается резкое возрастание сил отталкивания. При $r = r_o$ силы притяжения и отталкивания сравняются. В дальнейшем сближение атомов будет сопровождаться интенсивным возрастанием сил отталкива ния.

В идеальном случае атомы после некоторых колебательных движений должны самопроизвольно установиться на расстояние $r = r_0$, когда $P_{пр} - P_{от} = 0$.

В этот момент величина потенциальной энергии системы W будет минимальна, что характерно для устойчивого равновесия (рис. 22.1, *б)*. Стремление системы к минимуму свободной энергии соответствует второму закону термодинамики, а минимум потенциальной энергии W_B — энергии ван-дер-ваальсовой связи. Если энергию поверхности монокристалла принять за W_n, то после соединения монокристаллов между ними устанавливается одна поверхность раздела с энергией W_B. Эта энергия меньше суммарной энергии двух поверхностей, т. е. $W_B \ll 2W_n$.

Рассмотренная схема образования монолитного соединения при сварке, не

противоречащая второму закону термодинамики, возможна, однако, при наличии некоторой энергии активации, а не только в результате сближения соединяемых поверхностей Поэтому в любом случае для сварки обязательно потребуется затратить энергию активации W_n например в виде теплоты (термическая активация) или упругопластической деформации (механическая активация).

Образование монолитного соединения в реальных условиях затруднено из-за наличия на поверхностях деталей микронеровностей, оксидных пленок, адсорбированных газов, различного рода загрязнений.

В зависимости от характера вводимой энергии все сварочные процессы (сварку, пайку, резку) можно отнести к термическим (Т), термомеханическим (ТМ) и механическим (М) методам.

При **термических** методах сварки с помощью внешнего источника нагрева кромки расплавляются, образуя так называемую сварочную ванну. Расплавление металла способствует его объединению в единое целое.

После прекращения поступления теплоты к сварочной ванне (удаление источника теплоты или его отключение) происходит быстрое охлаждение и последующая кристаллизация расплавленного металла при максимальном теплоотводе в стенки ванны. Процесс кристаллизации заканчивается образованием монолитного шва, который связывает свариваемые детали в единое целое. Аналогично при пайке вследствие кристаллизации припоя, заполняющего зазор между деталями и смачивающего нагретые поверхности, образуется паяное соединение.

При **механических** методах сварки необходимо приложить давление, под влиянием которого в месте сварки возникают значительные упруго-пластические деформации, вызывающие разрушение оксидной пленки, смятие микронеровностей, обеспечение физического контакта и образование между атомами прочных связей, соответствующих связям при расстоянии между ними, равном параметру кристаллической решетки.

При **термомеханических** методах сварки металл в месте соединения деталей нагревается от внешних источников теплоты до температуры плавления или пластического состояния. Нагревание позволяет снизить удельное давление, уменьшить величину минимальной относительной деформации, необходимой для сварки.

В соответствии с термодинамическим определением процессов сварки основными признаками для их классификации должны служить: форма вводимой энергии, наличие давления и вид инструмента — носителя энергии, на основании чего классифицируются виды сварки (табл. 22.1).

Таблица 22.1. Классификация видов сварки

		Класс	
Виды сварки	термический		механический
	Дуговая	Контактная	Холодная
	Электрошлакова	Диффузионная	Взрывом
	Электронно-	Индукционно-	Ультразвуковая
	Плазменная	Газопрессовая	Трением
	Ионно-лучевая	Дугопрессовая	Магнитно-
	Тлеющим	Шлакопрессовая	
	Световая	Термокомпрессион	
	Индукционная Газовая Термитная Литейная	Печная	

Кроме того, сварку классифицируют и по другим признакам:

а) способу защиты металла в зоне сварки (сварка на воздухе, в вакууме, в защитном газе, под флюсом и т. п.);

б) непрерывности сварки (непрерывные и прерывистые , т. е. импульсные процессы);

в) степени механизации (ручная, механизированная, автоматическая);

г) технологическим (вид электрода или дуги, род сварочного тока, полярность, тип и количество электрических дуг и т. п.).

22.2. Особенности применения сварки плавлением и давлением

Различия в способах образования монолитного соединения при сварке плавлением и давлением в определенной степени определяют подход к их выбору при изготовлении сварных конструкций.

Методы сварки плавлением получили широкое распространение благодаря их преимуществам по сравнению с другими методами:

1) возможностью сварки в монтажных и цеховых условиях;
2) разнообразием применяемых типов соединений;
3) возможностями сварки конструкций различных габаритов;
4) широким диапазоном свариваемых толщин металла — от нескольких микрометров, например при сварке световым лучом, до 1 м и более при электрошлаковой сварке;
5) возможностью изменения химического состава наплавленного металла. При сварке можно изменить химический состав наплавленного металла, применяя сварочные проволоки различных марок и внося легирующие элементы в электродное покрытие или флюс. Это широко используется при сварке низколегированных и легированных сталей;
6) возможностью сварки швов в любых пространственных положениях.

Сварка плавлением, однако, имеет ряд недостатков.

1. Кристаллизация металла шва протекает при растягивающих напряжениях, что является одной из причин образования трещин.
2. Необходима защита металла шва от воздействия атмосферы. Если не принимать каких-либо мер по его защите, то наплавленный металл будет иметь по сравнению с основным весьма низкие механические свойства, прежде всего пластичность. Создание шлаковой и газовой защиты, применение вакуума уменьшают влияние атмосферы на металл или исключают его полностью.
3. Возможно образование (особенно при сварке разнородных металлов) в наплавленном металле хрупких интерметаллических включений, ликвации примесей в шве. Степень ликвации, как и само число включений в металле, а также их расположение в шве, влияют на прочность сварных конструкций. Примеси часто являются причиной возникновения трещин при сварке.
4. Образуются напряжения и деформации при сварке.
5. Изменяется структура основного металла под влиянием нагрева при сварке.

Методы сварки давлением (термомеханические и механические) имеют определенные преимущества по сравнению с методами сварки плавлением.

Применение способов сварки давлением значительно расширило диапазон свариваемых материалов, в том числе разнородных металлов, а также неметаллических материалов, исключило в ряде случаев возникновение при сварке трещин, пористости, способствовало уменьшению деформаций сварных узлов. Важным является тот факт, что сварка давлением вызывает менее значительные изменения основного металла, чем сварка плавлением, хотя упругопластические деформации, необходимые при сварке без нагрева, приводят к некоторому физическому упрочнению металла шва и прилегающих к нему участков. В результате ухудшается пластичность металла, что следует учитывать при назначении конструктором механических методов сварки.

Термомеханические и механические методы легче механизировать и автоматизировать, при большинстве из них достигается высокая производительность. Все это предопределило достаточно широкую область применения способов сварки давлением.

В то же время некоторые особенности указанных технологических процессов, связанные в основном с необходимостью использования при сварке давления, ограничивают их применение в ряде конструкций.

Контрольные вопросы

1. Какие основные причины препятствуют образованию монолитного сварного соединения и каковы способы их устранения?
2. Назовите сопутствующие явления при сварке плавлением или давлением. Их влияние на свойства основного материала и сварной конструкции.
3. Какие факторы способствуют широкому применению сварки в современных конструкциях?
4. По какому принципу классифицируются методы сварки?

Глава 23. Термические виды сварки

23.1. Сварочные источники теплоты

В настоящее время около 70% всех сварочных работ выполняются методами плавления. Дня плавления применяют следующие источники теплоты: дуговые, плазменно-дуговые, электронно- и ионно-лучевые, световые, индукционные, электрошлаковые и др.

Электрическая дуга. Сварочная дута — это электрический разряд, длительно существующий между электродами, находящимися под напряжением. Одним из электродов может быть изделие (рис. 23.1, а).

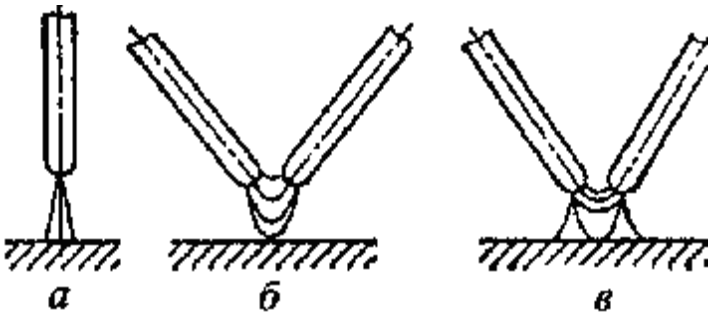

Рис. 23.1. Виды дуг: *а* — дуга прямого действия; *б*—дуга косвенного действия; е — трехфазная дуга

Такая дуга получила название дуги прямого действия, а в случае горения дуги между двумя элек-
тродами при отсутствии электрической связи с изделием — дуги косвенного действия (рис. 23.1, б). Может быть и комбинированный вариант, как это имеет место при сварке трехфазной дугой (рис. 23.1, в).

Дуга прямого действия более эффективна по тепловложению в металл, чем косвенная.

Электрический разряд сварочной дуги происходит в смеси газов и паров металла. Он характеризуется высокой температурой газов, сильным свечением, большим током разряда и сравнительно невысоким напряжением, которое складывается из падения напряжения на катоде U_K, аноде $U_а$ и в столбе дуги $U_{ст}$ (рис. 23.2), т. е.

$$U_д = U_к + U_В + U_{ст}.$$

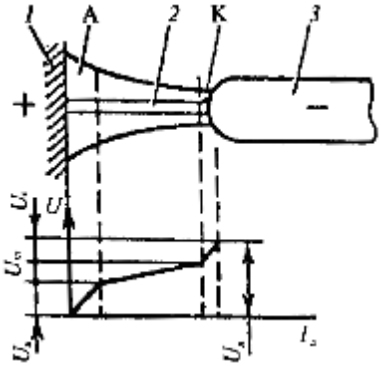

Рис. 23.2. Зоны дугового разряда и характер падения в нем потенциала: А — анодная область; К — катодная область; *1* — деталь; *2* — столб дуги; *3* — электрод

На поверхности катода и анода различают соответственно катодные и анодные пятна, представляющие собой наиболее нагретые участки, через которые проходит весь ток. Температура столба дуги для разных методов сварки колеблется в пределах 6000—15000 К. Следует отметить, что подобное строение имеет дуга достаточной протяженности. В короткой дуге практически могут смыкаться анодная и катодная зоны. Сопротивление дугового разряда непостоянно, так как зависит от количества заряженных частиц, т. е. от степени ионизации, а последняя связана с силой сварочного тока. Поэтому вольтамперная характеристика дуги (рис. 23.3) нелинейна и имеет участок *I*, где напряжение падает по мере возрастания тока вследствие интенсивного увеличения числа заряженных частиц; *II*

— участок поло-говозрастаюшей характеристики; *III* — возрастающей. На участке *II* напряжение мало зависит от тока, так как число заряженных частиц возрастает по мере его увеличения незначительно и одновременно сокращаются размеры столба дуги. При сварке на высоких плотностях тока (участок *III)* столб дуги под влиянием электромагнитных сил сжимается, число заряженных частиц возрастать существенно не может, что. приводит к практически постоянному значению электрического сопротивления столба дуги. На этом участке можно с высокой достоверностью считать действующим закон Ома $U_д = IR$.

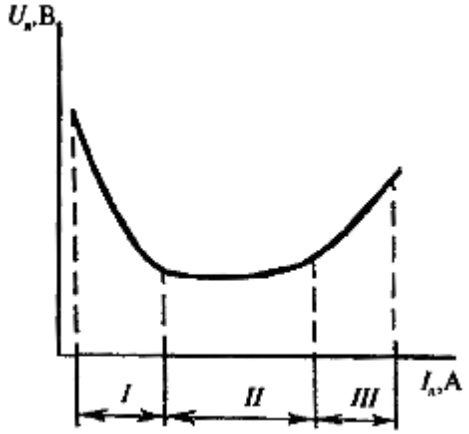

Рис. 23.3. Вольт-амперная характеристика сварочной дуги: $U_д$ — напряжение дуги; $I_д$—ток дуги

В обычных условиях газовый промежуток между электродами является неэлектропроводным. Возбуждение дуги и ее устойчивое горение зависят от многих причин и обусловлены степенью ионизации дугового промежутка. Ионизация происходит под влиянием мощного потока электронов, который образуется в результате термоэлектронной и фотоэлектронной эмиссии.

Количество теплоты, введенное в изделие, определяется эффективным коэффициентом полезного действия сварочной дуги:

$$\eta_{эф} = \frac{q}{q_{пол}} = \frac{q}{0{,}24 U_д I_д},$$

где $\eta_{эф}$ — эффективный КПД процесса нагрева дугой; q — количество теплоты, введенное в металл изделия, Дж/с; $U_д$ — напряжение на дуге, В; $I_д$ — сила сварочного тока, А.

Сварочная дуга может гореть между неплавящимся или плавящимся электродами и деталью. В качестве неплавящегося электрода применяется графит, чаще — вольфрам. Для предупреждения его оплавления и эрозии допустимая плотность тока ограничивается.

Если дуга горит между плавящимся электродом и деталью, то функции электрода расширяются. Он служит не только носителем потенциала, но и, расплавляясь, заполняет сварочную ванну металлом, вносит в нее дополнительное количество теплоты, что повышает КПД процесса.

Ток, применяемый в дуге, может быть постоянным или переменным. Устойчивость горения дуги на постоянном токе выше, чем на переменном, так как в последнем случае при переходе напряжения через нуль и перемене полярности в начале и конце каждого полупериода температура дугового промежутка уменьшается, что вызывает деионизацию газов. Устойчивость горения дуги на переменном токе значительно возрастает, если через покрытие или проволоку в дуговой промежуток ввести легко ионизируемые элементы, например калий, кальций и др.

Сварка дугой постоянного тока, когда к электроду подключен отрицательный полюс источника тока, а к изделию — положительный, получила название сварки **д у г о й прямой п о л я р н о с т и**; сварка, когда электрод соединен с положительным полюсом источника тока, а изделие — с отрицательным, — **обратной полярности**. Для дуги прямой полярности характерно большее выделение теплоты на изделии, а обратной — на электроде.

Применяется при сварке и дуга переменного тока, в том числе при сварке цветных металлов неплавящимся электродом и ручной дуговой сварке.

Электрические сварочные дуги могут быть непрерывные и прерывистые, импульсные. **Импульсная дуга** по сравнению с обычной имеет следующие преимущества: более совершенное управление процессом плавления проволоки; сокращение величины зоны термического влияния и размеров кристаллов в шве; снижение нижнего предела рабочих токов и повышение устойчивости горения дуги; улучшение условий для сварки в вертикальном и потолочном положениях.

Если электрическая дуга функционирует в замкнутом канале — цилиндре, то такая дуга относится к сжатым дугам, а сам источник нагрева получил название **плазменно-лучевого** или **плазменно-дугового**. На рис. 23.4 представлены схемы свободно горящей, стабилизированной и сжатой (плазменной) дуги. В последнем случае дуга функционирует внутри канала, ограниченного стенками водоохлаждаемого сопла.

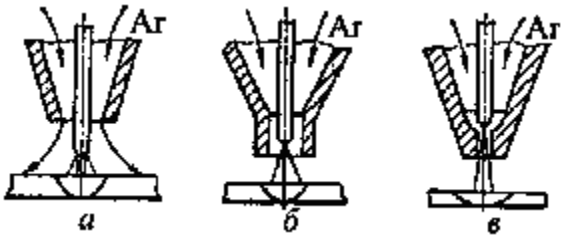

Рис 23.4. Схемы свободно горящей *(а)*, стабилизированной (б) и сжатой (в) дуги

Напряжение плазменной дуги выше, чем свободно горящей (рис. 23.5), что позволяет, вследствие повышения мощности дуги, увеличить производительность сварки.

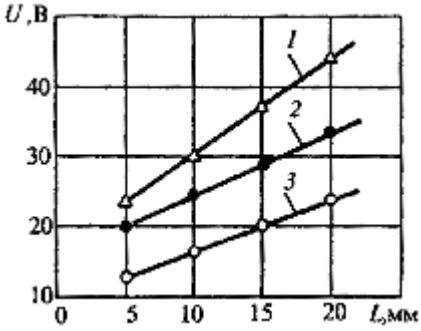

Рис. 23.5. Зависимость напряжения дуги от ее длины:
1— сжатая дуга; 2 — стабилизированная дуга; 3 — свободно горящая дуга

В обычных условиях дуговой разряд в вакууме не возбуждается, так как для этого необходимы высокое напряжение и наличие газов или паров металла. Однако в качестве источника нагрева при сварке можно использовать дуговой разряд в вакууме, стабилизированный струей разреженного инертного газа. Катод в таком случае представляет собой полую трубку небольшого диаметра из тугоплавкого материала (вольфрам, тантал). Сквозь полый катод в вакуумную камеру подается инертный газ (аргон или гелий) с расходом около 0,5—0,6 л/ч, что практически не влияет на динамический вакуум в камере. Дуговой разряд возбуждается между полым катодом и изделием, так как в этом месте давление повышается в результате поступления инертного газа. Узкая струя ионизированной аргонной плазмы является эффективным источником нагрева для сварки и пайки в вакууме.

В зависимости от назначения для питанияэлектрических дуг применяют источники постоянного, переменного, импульсного тока. В качестве источников постоянного тока используют источники питания на базе выпрямителей и сварочного однофазного или трехфазного трансформатора или, реже, мотор-генераторы. Снабженные двигателем внутреннего сгорания генераторы применяют в полевых, монтажных условиях.

При сварке на переменном токе используют понижающие трансформаторы. Такие источники питания включают в себя в ряде случаев устройства для зажигания дуги, стабилизации ее горения.

Так как процесс сварки может начинаться с касания электродом изделия, например при ручной дуговой сварке, т. е. с режима короткого замыкания, то источники питания обеспечивают

ограничение силы тока короткого замыкания. Обычно источники питания имеют напряжение 65—75 В, снижающееся после возбуждения дуги. Частота переменного тока — 50 Гц.

В последнее время получили распространение инверторные источники, позволяющие сваривать током высокой частоты, управлять в широких пределах его параметрами.

Электронно- и ионно-лучевой нагрев. Электронно-лучевой нагрев заключается в бомбардировке металла потоком ускоренных электронов, кинетическая энергия которых при торможении в его поверхностном слое превращается в тепловую, причем КПД процесса достигает 0,85—0,9. Мощность *W*, передаваемая изделию, зависит от тока пучка электронов *I* и ускоряющего напряжения *U*, т. е.

$$W=\eta_{эф} IU$$

В современных сварочных установках ускоряющее напряжение между катодом и анодом (рис. 23.6), расположенных на небольшом расстоянии друг от *друга*, создает большую напряженность электростатического поля, в котором электроны, эмит-тированные нагретым катодом, разгоняются до огромных скоростей. Определить скорость электрона можно по формуле

$$v=\sqrt{2\frac{eU}{m}},$$

где *e*—заряд электрона, Кл; *m* — масса электрона, г; *U*— ускоряющее напряжение, В.

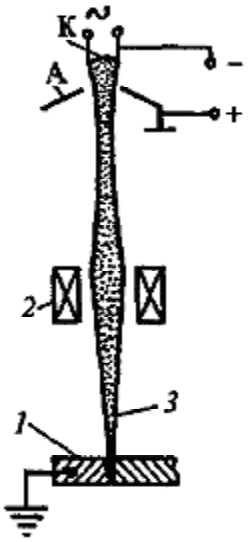

Рис. 23.6. Схема электронно-лучевой установки: К — катод; А — анод; 1 — деталь; 2 — электромагнитная линза; 3 — пучок ускоренных электронов

С помощью магнитной линзы поток ускоренных электронов формируется в узкий пучок н направляется на изделие; здесь он сосредоточивается на небольшом участке, чем достигается высокая удельная мощность в пятне нагрева.

Ионная бомбардировка позволяет не только нагреть металл, но и при определенных условиях производить одновременно со сваркой физическую и химическую очистку его поверхности, а также изменять его свойства внедрением ионов в поверхностный слой свариваемой детали.

При сварке ионным лучом практически отсутствует рентгеновское излучение, в то время как при электронно-лучевом нагреве оно может достигать значительной величины.

В качестве источника ионов применяют специальные плазмотроны или другие устройства, в которых ионизируется какой-либо элемент, например инертный газ — гелий. Удельная мощность в пятне нагрева при действии ионного пучка значительно ниже, чем при электронно-лучевом нагреве.

Световые источники нагрева — это источники теплоты, использующие энергию лазеров, солнечную, а также энергию искусственных источников света.

Наибольшее распространение получила сварка с помощью оптических квантовых генераторов — лазеров — с твердотельными активными элементами (стержни из алюмоиттриевого граната, рубина, стекла с неодимом и т. д.) и газовых генераторов, где активным элементом является столб газовой смеси ($C0_2$, азот и т. д.).

Твердотельные лазеры работают в импульсном режиме (частота 1—300 Гц), газовые — обеспечивают непрерывное излучение, что достигается лучшими условиями охлаждения активного элемента. Принцип работы оптических квантовых генераторов заключается в возбуждении атомов (ионов) активного элемента с помощью внешнего источника энергии, например импульсной лампы большой мощности у твердотельных лазеров, при этом часть электронов этих атомов переходит на более высокий энергетический уровень. Возникающая перенаселенность верхних энергетических уровней приводит атомы в неустойчивое, неравновесное состояние. Последующий спонтанный переход электронов на низшие энергетические уровни сопровождается испусканием строго определенной длиной волны кванта света (фотона), способного вызвать вынужденный (индуцированный) переход электронов других атомов с верхних, перенаселенных, на нижние энергетические уровни. Испускаемые новые фотоны вызывают нарастание индуцированных переходов и приводят к возникновению лавинообразного потока фотонов, т. е. генератор испускает световой луч большой интенсивности.

На рис. 23.7, *а* показана схема газового электроразрядного лазера с продольной прокачкой газа $C0_2$. Вывод луча осуществляется через зеркало резонатора *2*. Затем луч фокусируется с помощью линз. Возбуждение молекул газовой смеси происходит в кольцевом электроде *1*. Недостатком указанной схемы является необходимость иметь длинную разрядную трубку, если нужна большая мощность лазера.

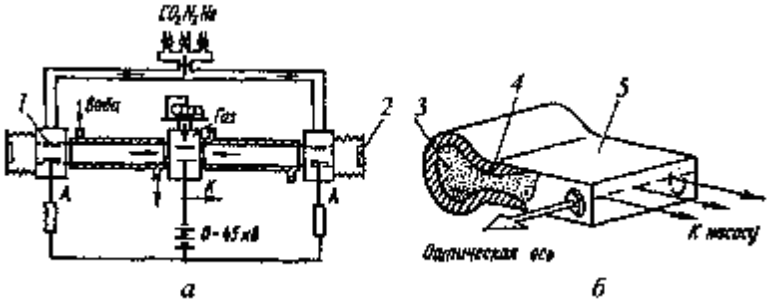

Рис. 23.7. Схема газовых ($C0_2$) лазеров

В настоящее время наибольшая мощность достигается у газодинамических лазеров, использующих смесь из $C0_2$ (7,5 %), N_2 (91,3 %) и H_20 (1,2 %). Разогретая до 700—3000 °С смесь газов находится под давлением 981 ГПа в камере *3* (рис. 23.7, б), затем проходит со сверхзвуковой скоростью через сопло Лаваля *4* в камеру 5, где происходит ее охлаждение до T~ 250 °С вследствие адиабатического расширения газа. Возбужденные молекулы $C0_2$ при охлаждении переходят на более низкий энергетический уровень, испуская когерентное излучение.

Излучение лазера, сфокусированное специальными оптическими устройствами, может выделять на поверхности металла большое количество теплоты. Часть этой теплоты в виде квантов света поглощается электронами проводимости металла. Они передают свою энергию кристаллическим решеткам. Нагрев последующих слоев осуществляется вследствие теплопроводности. Особенностью светового нагрева является отражение части энергии поверхностью металла. Степень отражения зависит от состояния поверхности свариваемого металла. Нанесение специальной поглощающей пленки повышает КПД процесса. Исследования показывают, что минимальное отражение совпадает с максимумом мощности светового импульса. В первый период, когда нагрев лучом еще не изменил поверхности металла, отражение луча большое. После испарения части металла, появления шероховатостей на его поверхности, вызванных действием переднего фронта светового импульса, отражение уменьшается. Поэтому для повышения эффективности нагрева следует с помощью специального лазера подавать два чередующихся различных по мощности импульса или использовать наложение излучения лазера импульсного и непрерывного действия. В таком случае можно сформировать импульс, мощность в котором изменяется (рис. 23.8).

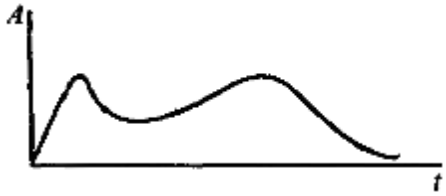

Рис. 23.8. Изменение мощности излучения *A* в течение двух последовательных импульсов

Первая часть импульса несет высокую плотность энергии *A*, обеспечивая нагрев при меньшем коэффициенте отражения, вторая часть — основную долю энергии, необходимую для расплавления. Луч этот менее сфокусирован, но отражение его будет уменьшено вследствие ухудшения отражательной способности металла первым импульсом.

Световые источники нагрева, использующие солнечную энергию или энергию искусственных источников света — ксеноновых или кварцевых ламп, — по своей физической сущности мало отличаются от лазерных, хотя некоторые их параметры, прежде всего малая удельная тепловая мощность, снижают эффективность указанных источников теплоты.

Газовое пламя как источник сварочной теплоты образуется чаще всего за счет сгорания в специальных горелках какого-либо горючего газа, например ацетилена, кислорода. Структура подобного пламени показана на рис. 23.9.

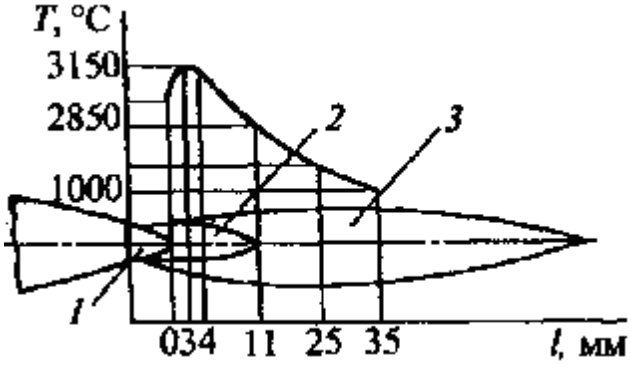

Рис. 23.9. Строение пламени газовой горелки и распределение температур по ее длине: *1*— ядро; *2* — восстановительная зона; *3* — факел

Пламя состоит из ядра, небольшой четко очерченной и самой яркой части пламени, восстановительной зоны и факела. Температура в ядре невысокая и равна~300—600°С. В восстановительной зоне, имеющей максимальную температуру 3150 °С, происходит неполное сгорание ацетилена с образованием $CO + H_2$. Поэтому сварка производится именно в этой зоне. Газовое пламя может обеспечить невысокую концентрацию тепловой энергии.

В табл. 23.1 приведены данные по тепловой концентрации для ряда источников теплоты. На основании их можно сделать вывод о том, что в настоящее время можно достичь минимального тепловложения в металл при термической сварке, применяя световой (лазерная сварка) и электронный луч.

Таблица 23.1. **Энергетические характеристики сварочных источников теплоты**

Виды сварки	Минимальная	Максимальная	Погонная энергия,
	площадь пятна	плотность	Дж/м
	нагрева, м^2	энергии, Вт/м	
Газовая сварка	10^{-6}	$5\cdot10^{8}$	$52\cdot10^{5}$
Ручная дуговая сварка	10^{-7}	10^{11}	$23\cdot10^{5}$
Аргонодуговая плавящимся электродом	10^{-7}	10^{11}	$13\cdot10^{5}$
Ионно- лучевая	10^{-7}—10^{-8}	—	—
Микроплазменная	10^{-11}	10^{12}	$8\cdot10^{5}$
Электронно-лучевая	10^{-11}	10^{13}	$1{,}5\cdot10^{5}$
Лазерная	10^{-12}	10^{14}	$0{,}4\cdot10^{5}$

23.2. Ручная дуговая сварка

Дуговая сварка выполняется неплавящимся и плавящимся металлическими электродами.

В первом случае дуга возбуждается между основным металлом и вольфрамовым (реже — угольным) электродом. Для заполнения разделки кромок обычно применяется присадочный материал в виде металлического стержня, подаваемого сварщиком в дугу.

При электрической дуговой ручной сварке металлическим электродом (рис. 23.10) дуга горит между основным металлом и электродом, служащим присадочным металлом. В качестве электрода применяется стержень из проволоки, близкой по химическому составу к свариваемому материалу.

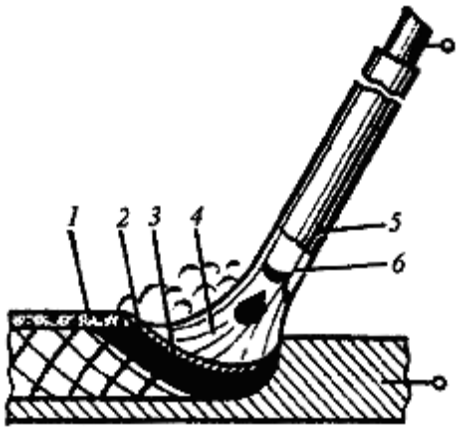

Рис. 23.10. Схема дуговой электрической сварки металлическим электродом: *1* — затвердевший шлак; *2* — слой расплавленного шлака; *3* — сварочная ванна; *4* — дуга; 5 — электродное покрытие; *6* — металлический стержень

На электроды наносят специальные покрытия с целью:

1) создания шлаковой и газовой защиты расплавленного металла сварочной ванны (шлак защищает и капли металла в процессе перехода их с электрода в шов, обволакивая их);

2) раскисления наплавленного металла с помощью добавок в покрытие таких элементов, как Mn,
Si, Ti, A1 в виде ферросплавов или чистых элементов;

3) легирования наплавленного металла, что позволяет из менять его химический состав, а также расширяет возможность получения требуемых свойств наплавленного металла;

4) улучшения стабильности горения дуги посредством включения в покрытие элементов с малым потенциалом ионизации.

Ручная дуговая сварка применяется главным образом в изделиях, имеющих короткие и прерывистые швы, швы сложной конфигурации, т. е. там, где трудно или
невыгодно применять автоматические методы сварки. Положительной стороной ручной сварки является возможность производить сварку в любом пространственном положении, что особенно

важно для сварки в монтажных условиях.

К недостаткам ручной дуговой сварки относятся: трудности сварки тонкого материала (менее 1—2 мм), длительный срок обучения сварщика высокой квалификации (1,0—1,5 г), большая зависимость качества сварки от индивидуальных особенностей сварщика, малая производительность.

Ручной дуговой сваркой можно сваривать стали, чугун, медь и медные сплавы. Естественно, что для каждого металла и его сплавов необходимо применять соответствующие электродные проволоки и покрытия. Виды соединений для ручной дуговой сварки приведены на рис. 23.11.

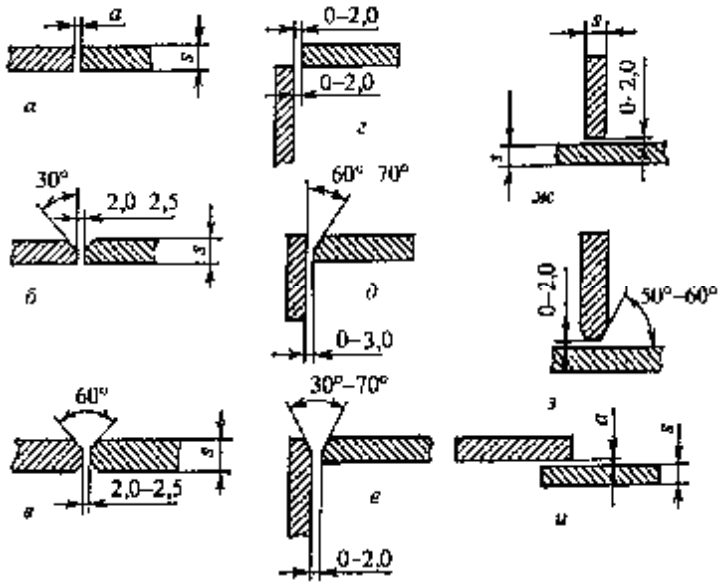

Рис. 23.11. Рекомендуемые типы соединений для ручной дуговой сварки

Соединение стыковое без разделки кромок (рис. 23.11, *а*) рекомендуется для толщин металла не более 3 мм. Наличие зазора обеспечивает полное проплавление. Зазор *а* при *S* = 1—2 мм должен быть равен 0—1 мм, а при S = 3мм— *а* = 0-1,5мм.

Соединения стыковые с V-образной разделкой кромок (рис. 23.11, *б)* рекомендуются для толщины 3—21 мм. Если толщина больше (до 30 мм) или необходимо уменьшить угловые деформации и площадь сечения шва, то применяют стыковое соединение с Х-образной разделкой кромок (рис. 23.11, *в)*.

При этом необходимо иметь в виду, что сварка такого соединения требует доступа к нему с двух сторон.

Из угловых соединений (рис. 23.11, *г, д, е)* соединение типа *г* рекомендуется для толщин не более 8 мм, соединение типа *д* — для толщин не более 26 мм. Для больших толщин рекомендуется соединение типа *е*.

Тавровое соединение указанного вида (рис. 23.11, *ж)* рекомендуется для толщины не более 5—6 мм. В случае больших толщин на вертикальной стенке снимаются двусторонние фаски (рис. 23.11, з).

Соединение нахлесточное (рис. 23.11, u) применяется при *s* = 2—6 мм. Зазор *а* допускается от 0 до 4 мм. В отличие от стыкового соединения нахлесточное облегчает сборку сварных узлов, однако из-за несоосности соединяемых деталей при работе в таких соединениях возникает изгибающий момент, снижающий прочность соединения, особенно из высокопрочных материалов. Нахлесточное соединение нерационально как с точки зрения уменьшения расхода металла, так и снижения массы конструкции. При применении нахлесточного соединения, так же как таврового и углового, имеющих повышенную жесткость, больше вероятность образования трещин при сварке.

23.3. Автоматическая дуговая сварка под флюсом

При автоматической дуговой сварке под флюсом дуга горит под слоем флюса между непокрытым металлическим электродом и деталью, расплавляя некоторое количество флюса, поступающего из бункера (рис. 23.12).

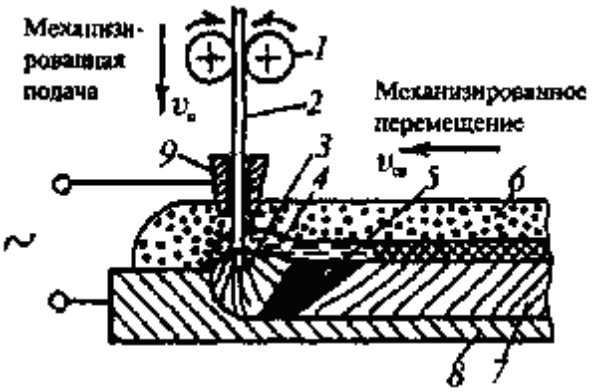

Рис. 23.12. Схема сварки под флюсом:
1 — механизм подачи электродной проволоки; 2— электродная проволока; *3* — электрическая дуга; *4* — жидкий шлак; *5* — расплавленный металл; *6*—флюс; 7 — шов; *8* — основной металл; 9 — токоведущая втулка; $\upsilon_п$ и $\upsilon_{св}$ — соответственно скорость подачи проволоки и скорость сварки
2

Газы и пары, выделяющиеся при плавлении флюса и металла, образуют пузырь, поднимая слой шлака над поверхностью сварочной ванны. Давление в пузыре уравновешивает слой флюса и шлака. По мере накопления в пузыре газов давление возрастает настолько, что оболочка пузыря разрывается, газы выходят наружу. Затем пузырь образуется вновь.

Подача электрода по мере его оплавления и перемещение вдоль шва полностью механизированы, что улучшает стабильность качества сварки и условия труда.

Автоматическая сварка под флюсом по сравнению с ручной имеет следующие преимущества.

1. Хорошую и сравнительно дешевую защиту расплавленного металла от воздействия атмосферного воздуха.

2. Производительность при автоматической сварке под флюсом по сравнению с ручной сваркой увеличивается в 5—25 раз в зависимости от толщины свариваемого металла и конструкции изделия. Повышение производительности при этом способе достигается вследствие увеличения плотности тока.

3. Лучшее качество сварного соединения из-за более надежной защиты расплавленного металла, однородности металла по химическому составу,
отсутствия перерывов в процессе сварки для смены электрода.

4. Более низкий расход электродного металла вследствие уменьшения доли электродного металла в образовании шва (с 70 до 30%), снижение потерь на угар, разбрызгивание и огарки.

5. Улучшение условий труда, так как отпадает необходимость защиты глаз от светового излучения и уменьшается количество вредных газов, выделяемых в процессе сварки.

6. Сокращение производственных площадей.

7. Сокращение времени на обучение сварщика.

Автоматическая сварка под флюсом имеет ряд существенных недостатков.

1. Повышенные требования к чистоте свариваемых кромок и сборке деталей.

2. Трудность сварки деталей толщиной 1—2 мм и менее, а также швов в потолочном положении и на вертикальной плоскости.

3. Невозможность визуального контроля за положением электрода.

4. Необходимость наличия подкладки (съемной или остающейся) при сварке с полным проплавлением для поддержания расплавленного металла. Это обусловлено повышенным давлением дуги на расплавленный металл сварочной ванны вследствие больших плотностей тока, применяемых при сварке под флюсом.

Автоматическая дуговая сварка под слоем флюса нашла широкое применение в изделиях из сталей различных марок. Этим способом можно сваривать медные и титановые сплавы, а также алюминиевые. Только в последнем случае дуга горит над

тонким слоем флюса, раскисляющим оксидную пленку алюминия.

Сварку под флюсом производят на автоматах, представляющих собой, например, самоходную тележку (трактор), снабженную сварочной головкой, пультом управления и т. п., или сварочные головки, устанавливаемые неподвижно. В последнем случае сварка производится за счет движения изделия.

Наряду с автоматической сваркой под флюсом применяется полуавтоматическая сварка, при которой подача проволоки к месту сварки производится с помощью редуктора и электродвигателя, а перемещение ее вдоль стыка в отличие от автоматической осуществляется вручную. Флюс поступает из бункера сварочного пистолета.

Полуавтоматическая сварка применяется для сварки швов сложной конфигурации небольшой протяженности, в единичном производстве, т. е. там, где автоматизировать полностью процесс сварки нерационально.

Все большее распространение получает сварка порошковой проволокой (рис. 23.13), как автоматическая, так и полуавтоматическая, что значительно упрощает процесс сварки, делает его более универсальным и экономичным. Поэтому сварка порошковой проволокой в ряде случаев вытесняет ручную дуговую сварку качественным электродом и сварку под флюсом.

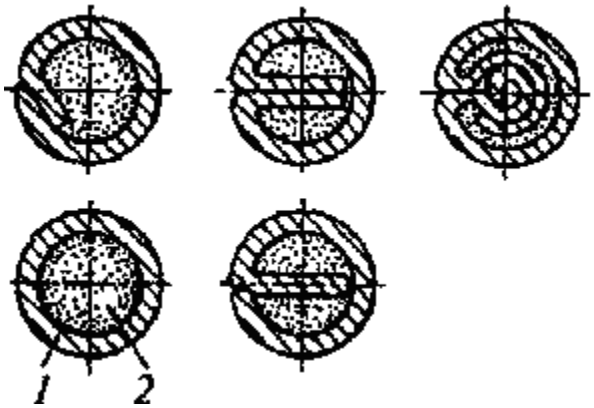

Рис. 23.13. Разновидности порошковой проволоки: *1* — стальная оболочка; *2* — порошковый наполнитель

С целью улучшения защиты расплавленного металла сварочной ванны применяют сварку порошковой проволокой с дополнительной защитой ванны углекислым газом или обычным флюсом.

23.4. Электрошлаковая сварка

Сущность электрошлаковой сварки заключается в том, что расплавление электродной проволоки и свариваемых кромок производится за счет теплоты расплавленного флюса, который нагревается при прохождении через него тока (рис. 23.14).

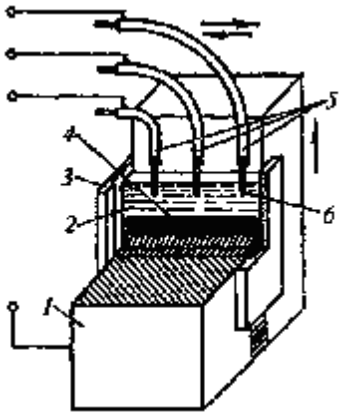

Рис. 23.14**.** Схема процесса электрошлаковой сварки: *1*— свариваемая деталь; *2* — шлаковая ванна; *3* — медные охлаждающие накладки; *4* — сварочная ванна; *5* — мундштуки, подводящие ток; 6 — электроды

Первоначально часть флюса расплавляется дугой, возбуждаемой между технологической подкладкой и электродом. Постепенно на подкладке образуются слой жидкого металла в результате плавления электродов и материала подкладки и жидкий шлак. По мере повышения температуры шлака под действием постоянно горящей неподвижной дуги увеличиваются его количество и электропроводность. Общее электрическое сопротивление слоя шлака значительной толщины становится соизмеримым с сопротивлением дуги, она шунтируется шлаком и гаснет. Далее процесс переходит в ту стадию, когда основная часть теплоты, требуемой для расплавления металла электрода и соединяемых деталей, генерируется в шлаковой ванне при прохождении через нее тока. Электрошлаковый процесс, таким образом, осуществляется благодаря джоулевой теплоте и является бездуговым.

Сварка выполняется вертикально снизу вверх. Свариваемые детали устанавливаются с зазором, величина которого зависит от толщины деталей. Снизу зазор ограничен технологической подкладкой, сбоку — водоохлаж даемыми медными накладками. При сварке используют один или несколько пластинчатых электродов или электроды из проволоки. Для равномерного заполнения стыка электродам иногда придают возвратно-поступательное перемещение вдоль плоскости стыка.

Медные водоохлаждаемые боковые накладки могут быть неподвижными (при малой высоте деталей) или перемещающимися снизу вверх по мере кристаллизации шва.

Электрошлаковой сваркой соединяяют детали толщиной более 40—50 мм, причем верхний предел свариваемых толщин практически не ограничен. Электрошлаковая сварка позволяет значительно повысить производительность, особенно при сварке металла большой толщины; обеспечить высокое качество сварного соединения вследствие надежной защиты жид ким шлаком от взаимодействия с атмосферой расплавленного металла; уменьшить пористость в наплавленном металле, что обусловлено более медленным охлаждением сварочной ванны, в результате чего пузырьки газа успевают всплыть на поверхность металла и удалиться; увеличить стойкость сварного шва к образованию трещин, что является следствием благоприятных условий охлаждения сварного соединения.

Стоимость сварочных работ при электрошлаковой сварке снижается, в том числе из-за уменьшения в 15—20 раз расхода флюса по сравнению с автоматической сваркой под флюсом и отсутствия необходимости в скосе кромок.

23.5. Дуговая сварка в защитных газах

Среди дуговых методов сварки, получивших достаточно широкое распространение, имеются такие, у которых защита расплавленного металла сварочной ванны от взаимодействия с воздухом осуществляется инертными, некоторыми активными газами или их смесью. Классификация способов сварки в защитных газах показана на рис. 23.15.

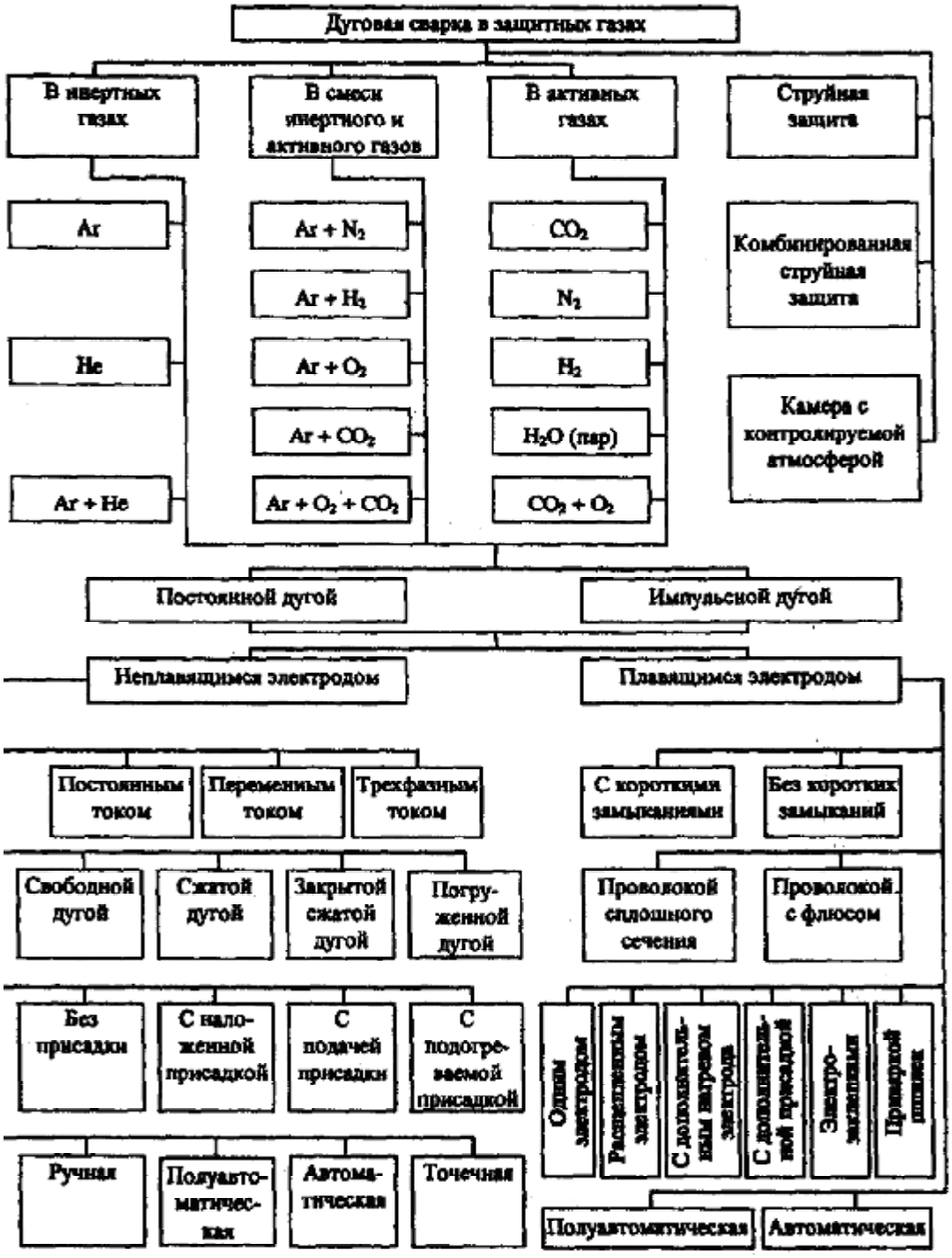

Рис. 23.15. Классификация способов сварки в защитных газах

Наибольшее распространение получила сварка в инертном газе аргоне и в углекислом газе, причем вследствие высокой стоимости инертных газов там, где это возможно, их заменяют углекислым газом или водородом, получаемым разложением дистиллированной воды электролизом непосредственно в сварочных установках. Сварку в инертных газах можно выполнять не-плавящимся и плавящимся электродами.

В качестве неплавящегося электрода (рис. 23.16, *а*) применяется пруток вольфрама, а в качестве плавящегося (рис. 23.16, б) — проволока из основного металла или близкого ему по химическому составу.

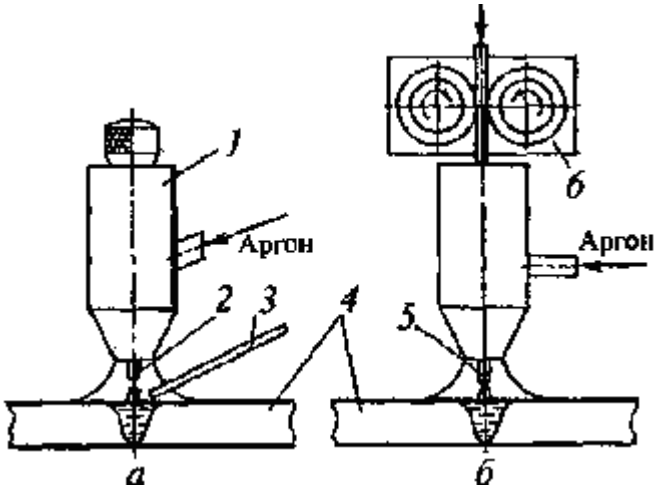

Рис. 23.16. Схема сварки в инертном газе: *а* — неплавящимся электродом; *б* — плавящимся электродом; / — горелка; *2* — неплавящийся (вольфрамовый) электрод; *3* — присадочная проволока; *4* — свариваемая деталь; *5* — электродная проволока (плавящийся электрод); *б* — механизм подачи

Сварка неплавящимся электродом бывает ручной, полуавтоматической и автоматической. При ручной сварке сварщик самостоятельно подает присадочную проволоку в зону дуги, где она оплавляется и перемещает горелку вдоль стыка свариваемого изделия. Если механизируется одно из этих перемещений, например подача проволоки в зону дуги, то сварку относят к полуавтоматической, если оба перемещения — к автоматической (рис. 23.17).

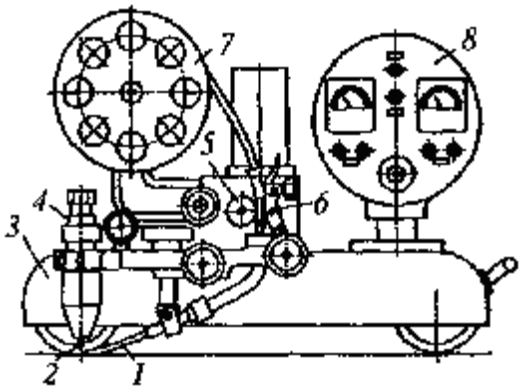

Рис. 23.17. Схема автомата АДСВ-2: *1* — присадочная проволока; *2* — вольфрамовый электрод; *3* — самоходная тележка; *4* — сварочная горелка; *5* — подающий ролик; *6* — прижимный ролик; 7 — барабан для сварочной проволоки; *8* — пульт управления

При сварке вольфрамовым электродом дуга горит очень устойчиво даже при малой плотности тока вследствие высокой термоэмиссионной способности вольфрама. Поэтому удается сваривать небольшие (до 0,1 мм) толщины металла. При сварке вольфрамовым электродом деталей больших толщин (свыше 8—10 мм) применяют более мощные трехфазные дуги.

При сварке плавящимся электродом дуга горит между концом проволоки, непрерывно подаваемой по мере ее оплавления в зону сварки, и изделием. При сварке плавящимся электродом можно применять ток значительной плотности, что повышает проплавляющую способность дуги. Однако механические свойства сварных соединений, особенно из легких сплавов, при сварке вольфрамовым электродом несколько выше, чем при сварке плавящимся электродом, и качество их стабильнее. Поэтому если требуются высокая прочность и плотность наплавленного металла, то сварка вольфрамовым электродом, чаще всего

трехфазной дугой, применяется и для металлов больших толщин.

Сварка в инертных газах, прежде всего аргонодуговая, широко используется в промышленности. Это объясняется следующими основными причинами.

1. Аргонодуговая сварка вольфрамовым электродом позволяет сваривать металл толщиной порядка 0,1—0,2 мм. Пониженное давление дуги обеспечивает сварку на весу с полным проплавлением стыковых соединений без применения поддерживающих подкладок.

2. Сварка возможна в любых пространственных положениях.

3. Аргон как инертный газ обеспечивает высококачественную защиту расплавленного металла.

4. При аргонодуговой сварке алюминиевых, магниевых и бериллиевых сплавов не требуется применять флюсы, так как оксидная пленка, препятствующая образованию шва, активно разрушается в результате катодного распыления.

5. Возможна сварка практически всех металлов и сплавов.

При сварке особо активных к кислороду металлов и сплавов струйной защиты сварочной ванны аргоном становится недостаточно. Решением проблемы является аргонодуговая сварка в контролируемой атмосфере, когда изделие или отдельные узлы помещают в специальные камеры, заполняемые аргоном. Камеры предварительно вакуумируют. Сварку в камерах производят или автоматически, или вручную с помощью герметичных резиновыхперчаток, вмонтированных в камеру. Возможна сварка и в обитаемых камерах с атмосферой аргона. Для сварки изделий сложных конфигураций свар- щик в специальном скафандре входит в камеру через шлюз.

Среди разновидностей аргонодуговой сварки особое место занимает импульсная.

Изменяя амплитуду тока, длительность импульсов и пауз между ними можно существенно влиять на скорость кристаллизации сварочной ванны и ее размеры.

Импульсная дуга благоприятно действует и на структуру околошовной зоны, в том числе уменьшает размеры зоны разупрочнения и деформации. Особый характер электродинамических сил при импульсной сварке позволяет увеличить (по сравнению с обычной) глубину проплавления, снизить потребляемое количество электроэнергии.

При ймпульсно-дуговом способе сварки повышается стабильность горения дуги, что позволяет значительно снизить нижний предел сварочного тока, соответствующий устойчивому горению дуги.

Импульсная сварка вольфрамовым электродом прежде всего применяется для сварки тонкого материала, так как кратковременное расплавление небольшой сварочной ванны позволяет избежать прожога. Импульсная дуговая сварка может производиться и на переменном токе. Повысить эффективность воздействия обычной дуги на металл можно с помощью концентрации ее энергии на меньшей площади, чего можно добиться соответствующим изменением размеров анодного пятна при сварке на постоянном токе. В настоящее время разработаны эффективные активирующие флюсы, которые уменьшают размер анодного пятна и позволяют получать швы с узким проплавом, что положительно влияет на уменьшение деформаций при сварке, сокращает зону термического влияния.

Одним из высокопроизводительных способов аргонодуговой сварки толстолистового материала является сварка погруженной дугой, проводимой как плавящимся, так и неплавящимся электродом. Наиболее широко применяется сварка погруженным вольфрамовым электродом. При этом методе: вольфрамовый электрод затачивают на конус с притуплением. Диаметр плоского конца электрода (притупления) порядка 2 мм. В процессе горения дуги по мере увеличения силы тока катодное пятно дуги покрывает всю площадь притупления. Столб дуги имеет четко выраженную цилиндрическую форму, и давление, оказываемое им на сварочную ванну, в этом случае максимально. Жидкий металл выдавливается из-под электрода, который опускают ниже поверхности свариваемого металла. Глубина погружения электрода определяется высотой столба жидкого металла, уравновешенного давлением дуги. Этим методом можно встык, без разделки кромок, за один проход сваривать стальные, алюминиевые или титановые детали толщиной **1**0 мм.

Высокое качество сварного соединения при аргонодуговой сварке достигается в результате поперечных колебаний дуги при ее перемещении в магнитном поле специальной катушки или колебаниям электрода вместе со сварочной горелкой с помощью механического

привода. Дуга, перемещаясь поперек шва с заданной частотой и амплитудой, которые можно регулировать, создает в переходной зоне и шве режим импульсного нагрева, оказывает на сварочную ванну давление, меняющееся по величине. Последнее наряду с особым тепловым режимом способствует образованию благоприятной структуры шва и околошовной зоны, снижению склонности к образованию трещин. Поэтому такая технология с успехом используется при сварке изделий из высокопрочных сталей.

Рекомендуемые типы сварных соединений для аргонодуговой сварки неплавящимся и плавящимся электродами приведены на рис. 23.18.

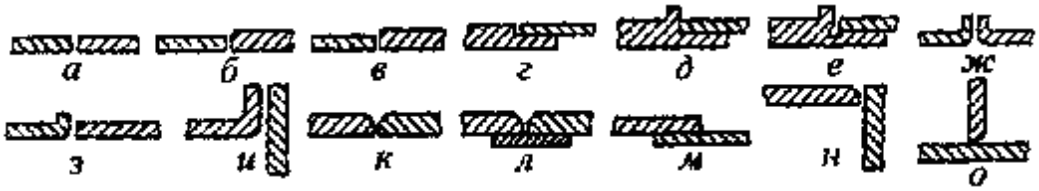

Рис. 23.18. Виды соединения для аргонодуговой сварки:
а, б, в, г, к, л, м, н, о — для сварки плавящимся и неплавящимся электродом; д, е, ж, з, и - для сварки неплавящимся электродом (е - вариант для алюминиевых и магниевых сплавов)

При сварке в инертных газах необходимо учитывать повышенную стоимость сварки изделий этим методом по сравнению, например, с автоматической под флюсом, возможность образования пористости при сварке недостаточно раскисленных металлов, нарушения нормального процесса сварки на открытых площадках, на сквозняке, где ухудшается газовая защита металла.

При сварке в углекислом газе может происходит окисление металла и выгорание легирующих элементов, так как в дуге под влиянием высокой температуры происходит диссоциация: $C0_2 = CO + 1/2O_2$.

Однако при наличии достаточного количества раскислителей они будут не только связывать свободный кислород и переводить его в шлак, но и восстанавливать некоторые оксиды. Поэтому при сварке в углекислом газе применяют проволоки с повышенным содержанием кремния и марганца по сравнению с ручной дуговой сваркой.

Хорошее качество сварного соединения получается при сварке в $C0_2$ порошковой проволокой.

Наличие свободного кислорода в дуге ограничивает применение сварки в углекислом газе. Ей пользуются только при сварке сталей, так как при сварке меди, алюминия, магния, титана и редких металлов невозможно связать свободный кислород введением каких-либо раскислителей. Преимуществами данного способа являются низкая стоимость углекислого газа и высокая производительность. Поэтому сварка в углекислом газе применяется в различных областях промышленности. Она производится на постоянном токе обратной полярности и бывает автоматической и полуавтоматической.

23.6. Плазменная сварка

Впервые сжатая дуга была с успехом использована для резки алюминиевых сплавов, коррозионностойких сталей, тугоплавких металлов. Новый источник теплоты оказался также весьма эффективным для напыления и наплавки, а также сварки.

При плазменной сварке в горелку (рис. 23.19) подаются плазмообразующий газ (аргон или смесь аргона с гелием, с углекислым газом и др.) и защитный газ. Первый обтекает вольфрамовый электрод и выходит через отверстие внутреннего сопла, второй подается во внешнее сопло и защищает сварочную ванну. В качестве защитного газа используется аргон. Для повышения мощности дуги к нему также могут добавляться другие газы (гелий, углекислый газ, азот).

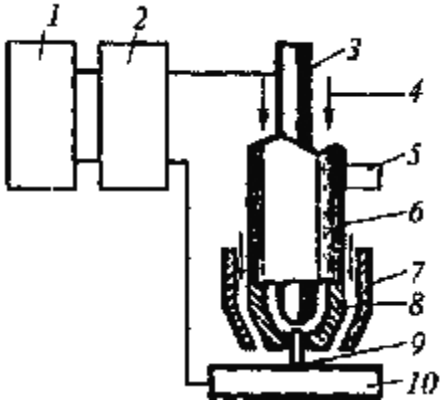

Рис. 23.19. Схема сварки плазменной дугой:
1 — сварочный источник питания; *2* — высокочастотный генератор; *3* — вольфрамовый электрод; *4* — плазмообразующий газ; *5* — охлаждающая вода; *б* — защитный газ; 7 — сопло защитного газа; *8* — сопло, формирующее дугу; 9 — дуга; *10* — изделие

В настоящее время наиболее широко применяется микроплазменная сварка (ручная и автоматическая), позволяющая сваривать детали толщиной 0,1—0,5 мм.

С помощью микроплазменной сварки изготавливают изделия типа сильфонов, тонкостенных трубопроводов, деталей приборов из легированных сталей, алюминиевых, титановых сплавов, некоторых тугоплавких металлов. При сварке титановых сплавов и тугоплавких металлов необходима дополнительная защита металла от окисления. Источники питания для микроплазменной сварки позволяют вести процесс в обычном и импульсном режимах.

Для плазменной сварки можно рекомендовать практически те же сварные соединения, что и для аргонодуговой сварки. Наиболее часто встречающиеся типы соединений при микроплазменной сварке — соединения с отбортовкой.

23.7. Электронно-лучевая сварка

Движение электронов в сварочной установке происходит в глубоком вакууме. Поэтому установка включает в себя герметичную камеру с системой откачивающих насосов.

Узкий шов, незначительные деформации, малые размеры зоны термического влияния, хорошая защита металла от взаимодействия с газами, экономичность и возможность автоматизации способствовали быстрому прогрессу электронно-лучевой сварки.

Несмотря на необходимость использования сложных, дорогостоящих установок, электронно-лучевая сварка может быть более экономична, чем сварка в камерах с защитной атмосферой, где применяют дорогостоящие защитные газы и расходуется больше электроэнергии. Для сварки крупногабаритных конструкций были созданы установки с местным вакуумированием или выводом луча в атмосферу. Наиболее рационально применение электронно-лучевой сварки в промышленности в следующих случаях:

1. Сварка изделий из тугоплавких активных металлов.
2. Сварка с минимальными деформациями и зоной термического влияния.
3. Сварка в труднодоступных местах, узких щелях.

4. Соединение разнородных металлов. Меньшее значение сварочных напряжений при электронно-лучевой сварке благоприятно сказывается на уменьшении склонности к образованию трещин при сварке разнородных металлов.

5. Сварка деталей малых толщин. Возможность тонкого регулирования мощности и диаметра электронного луча, небольшое давление его на сварочную ванну позволяют соединять детали толщиной в десятые и сотые доли миллиметра, что широко используется при изготовлении изделий электронной техники.

6. Сварка в космосе. Вакуум космического пространства может быть в перспективе использован для автоматической и ручной электронно-лучевой сварки отдельных деталей, узлов, при сборке космических платформ и различных ремонтных работах.

Недостатки электронно-лучевой сварки, которые следует учитывать при назначении этого метода для сварки конструкций и проектировании их узлов, заключаются в необходимости, как правило, использования камер, ограничивающих размеры свариваемых деталей; наличия рентгеновского излучения, которое должно поглощаться стенками камеры и требует периодического контроля; сложности и высокой стоимости оборудования.

23.8. Сварка в вакууме полым катодом

Данный вид сварки осуществляется следующим образом. Свариваемое изделие помещается в вакуумную камеру, в которой с помощью вакуумных насосов создается разрежение 0,33—0,0133 Па. Сварочный источник питания постоянного тока подключается к изделию — аноду — и полому вольфрамовому электроду — катоду. В канал электрода подается небольшое количество инертного газа аргона и дуга возбуждается. Если количество поступающего аргона дозировать так, чтобы в камере вакуум был не ниже 665 Па, то катодное пятно локализуется только внутри канала сопла, при этом достигаются фокусировка дуги и достаточно высокая концентрация тепловой энергии в анодном пятне.

При чрезмерном увеличении подачи газа давление в камере может превысить 665 Па, и тогда катодное пятно начнет блуждать по торцу электрода, нарушая тем самым нормальный процесс сварки.

При малых токах дуга, выходящая из электрода, практически не видна, а при сварке на больших токах представляет собой прозрачный голубоватый разряд цилиндрической формы. Дуга такой формы сохраняет одинаковую проплавляющую способность при колебаниях ее длины в большом диапазоне, что является существенным технологическим преимуществом по сравнению с обычной дугой. Кроме того, сварка полым катодом в вакууме обеспечивает высокую эффективность защиты металла, повышенную концентрацию тепловой энергии и не требует применения сложного оборудования (по сравнению с электронно-лучевой).

Сварка полым катодом имеет и ряд недостатков. Один из них — постепенный износ канала электрода. По мере сварки нижний край внутренней поверхности канала разрушается и канал на конце трубчатого электрода приобретает коническую форму. Так как катодное пятно стремится иметь минимальные размеры, а напряжение дуги должно сохраняться минимальным, то пятно постепенно заглубляется внутрь канала электрода, где давление газа больше. Однако перемещение катодного пятна вверх по электроду ограничено: электрод охлаждается и приближение пятна к участку интенсивного охлаждения снижает эмиссию электронов, приводит к затвердеванию расплавившегося на стенках канала материала электрода. Одновременно из-за роста длины дуги увеличивается напряжение. В итоге отверстие электрода из тугоплавкого металла начинает уменьшаться и может совсем заплавиться, а дуга гаснет. Поэтому время непрерывной работы электрода в зависимости от марки металла, из которого он изготовлен (вольфрам, молибден), диаметра отверстия электрода, силы тока ограничено 1—5 ч.

Недостатком рассмотренного метода сварки является также ограниченная мощность дуги, обусловленная стойкостью материала полого электрода.

Полым электродом в вакууме в настоящее время свариваются детали малой и средней толщины из активных по отношению к кислороду металлов, например титана.

23.9. Лазерная сварка

Лазерная сварка впервые стала применяться в радиоэлектронике при изготовлении электронных приборов. Для сварки использовались лазеры с твердым рабочим телом, работающие в импульсном режиме. Имея сравнительно небольшую мощность, низкий КПД, подобные лазерные установки не могли найти применения для изготовления конструкций. Однако создание мощных газовых лазеров непрерывного действия, имеющих более высокий КПД, чем твердотельные, внесло существенные коррективы в развитие лазерной сварки, в том числе в расширение использования ее в промышленности.

При выборе лазерной сварки необходимо учитывать, что она обеспечивает высококонцентрированный нагрев до 10^{11} Вт/м^2, а размеры самого пятна соответствуют диаметру не более десятых долей миллиметра. Поэтому лазерная сварка позволяет получать швы с минимальным расплавлением металла, снижает напряжения и деформации в сварных конструкциях по сравнению с другими способами сварки.

Необходимо принимать во внимание и такие качества лазерной сварки, как возможность сварки вне вакуума, через прозрачные среды, в труднодоступных местах и т. п. При прочих равных возможностях на выбор метода сварки определяющее влияние оказывают экономические показатели.

Особенности технологии лазерной сварки связаны, в основном, со стремлением снизить отражение луча от поверхности свариваемого металла, исключить его выброс из сварочной ванны под воздействием паров интенсивно испаряющегося металла и выделяющихся из него газов, при сварке больших толщин металлов — с необходимостью защиты сварочной ванны от взаимодействия с воздухом. Отражение от металла уменьшают подбором необходимой формы импульса лазера, специальной обработкой поверхности или нанесением на нее покрытия. Выброс металла из сварочной ванны происходит при импульсном режиме сварки и определяется характером нагрева металла.

Для увеличения глубины проплавления без выплеска форма импульса должна быть такой, чтобы нагрев поверхности происходил очень быстро, а далее мощность импульса уменьшалась и оставалась постоянной на уровне, способном обеспечивать продвижение фронта плавления в глубь металла.

Импульсной лазерной сваркой сваривают чаще всего между собой проволоку или проволоку с более массивными деталями, при этом лазерный луч позволяет вести сварку без зачистки контактов от изоляции, что увеличивает производительность сварки.

Непрерывная лазерная сварка металлов значительных толщин производится газовыми лазерами. При сварке непрерывным лазерным лучом большой мощности приходится устранять экранирующее влияние ионизированного облака, которое возникает при взаимодействии лазерного луча с атмосферой и испаряющимся металлом. Облако рассеивает луч и препятствует нагреву металла сварочной ванны. Устраняют облако, сдувая струей газа, чаще всего аргона, направляя ее перпендикулярно оси луча. Одновременно инертный газ защищает металл от окисления. Применение для защиты вместо аргона гелия или смеси гелия с водородом увеличивает проплавление лазерным лучом, но более легкий, чем аргон, гелий плохо вытесняет облако плазмы.

Непрерывная сварка лазером обеспечивает значительно большие скорости сварки по сравнению с импульсной.

При проектировании узлов и конструкций, изготовляемых с помощью лазерной сварки, рекомендуют соединения, где чаще всего шов получается путем проплавления основного металла.

23.10. Газовая сварка

Газовую сварку производят за счет теплоты, выделяемой при сгорании горючего газа, чаще всего ацетилена, в кислороде.

Для образования шва в сварочную ванну подают присадочную проволоку или сварку осуществляют по отбортовке, в результате плавления которой и формируется шов.

Исходные газы, C_2H_2 и 0_2, подаются в специальную горелку, где смешиваются и, выходя за ее наконечник, сгорают, образуя пламя. Мощность пламени регулируют сменой наконечников горелки, имеющих разные проходные сечения.

Регулируя количество ацетилена и кислорода, поступающих в горелку, можно получать нормальное, восстановительное и окислительное пламя, характер которого выбирают в зависимости от свариваемого материала.

Строение нормального пламени приведено на рис. 23.9. В первой зоне, ядре, содержатся исходные продукты C_2H_2 и O_2 и происходит их диссоциация; во второй, восстановительной, зоне — неполное сгорание с образованием CO и H_2. Оплавление металла производят именно згой зоной пламени. Максимум температуры T по длине пламени $l_{пл}$ приходится как раз на восстановительную зону вблизи от ядра. Факел состоит из продуктов полного сгорания $CO_2 + H_20$. Здесь окисление происходит за счет кислорода окружающего воздуха.

Газовая сварка сопровождается нагревом широкой зоны, большими деформациями металла, существенными изменениями его структуры. Производительность газовой сварки низкая, автоматизировать ее сложно. Поэтому она применяется для сварки, в основном, деталей малой толщины в монтажных условиях, при сварке стальных труб малого диаметра, а также в ремонтных работах. С помощью газовой сварки можно сваривать стали, алюминиевые сплавы, медь и ее сплавы, чугун.

Контрольные вопросы

1. Какие физико-химические принципы лежат в основе разных источников теплоты для термических видов сварки?
2. Какие параметры источников теплоты наиболее полно определяют их технологические возможности для сварки?
3. Как реализуется защита расплавленного металла в зависимости от вида сварки плавлением?
4. Сравните области применения электронно-лучевой и лазерной сварки.
5. Какова особенность горения дуги при сварке полым катодом в вакууме?