Министерство образования и науки, молодежи и спорта Украины

Донбасская государственная машиностроительная академия

**В.А.Пресняков**

**СПЕЦИАЛЬНЫЕ   
МЕТОДЫ СВАРКИ   
для студентов специальности**

**«Оборудование и технологии сварки»**

Конспект лекций

Краматорск

ДГМА

2012

Пресняков, В. А.

**Специальные методы сварки**: конспект лекций / В. А. Пресняков. – Краматорск: ДГМА, 2012. – 48 с.

В конспекте лекций содержатся сведения, необходимые для осуществления различных специальных методов сварки – холодной, ТВЧ, ультразвуковой, прокаткой, трением и др. Раскрывается физическая сущность методов, особенности их выполнения и области применения.

Предназначен для студентов, обучающихся по специальности «Оборудование и технологии сварки». Способствует расширению знаний и навыков будущего специалиста – инженера сварочного производства.

# ВВЕДЕНИЕ

Традиционные способы сварки во многих случаях не могут быть применены для соединения деталей из высокопрочных, коррозионно-стойких, магнитных и других специальных материалов, используемых в электротехнической, электронной промышленности, а также ядерной, космической технике, поскольку расплавление металла, протекание рекристаллизационных процессов и фазовых превращений, обусловленных термическим циклом сварки, приводит к необратимым изменениям структуры и, соответственно, потере свойств материалов и снижению качества изготовленных из них изделий в целом.

Созданные в последнее время сверхжаропрочные материалы и изделия из них практически невозможно сварить существующими способами сварки плавлением.

В этой связи в 50-х годах XX в. появилась группа *специальных методов сварки* вышеперечисленных материалов. Название этой группы условно связано с относительно редкой разновидностью видов сварки и высокой стоимостью оборудования и технической сложностью осуществления технологического процесса.

Несмотря на относительно небольшую область применения, значение этой группы способов сварки весьма велико.

В настоящее время в сварочном производстве находят применение специальные методы сварки, которые можно разделить на две группы: сварки в твердой фазе и сварки плавлением с применением высокоэффективных источников энергии.

# 1. ГРУППА МЕТОДОВ СВАРКИ В ТВЕРДОЙ ФАЗЕ

## 1.1. Физические основы сварки

В настоящее время используются способы сварки, при которых соединение деталей осуществляется в твердой фазе при температурах ниже точки плавления свариваемых материалов с приложением давления, достаточного для создания необходимой пластической деформации деталей в зоне сварки. В соответствии с ГОСТ 2601-84 к группе сварки давлением относятся следующие: сварка взрывом, магнито-импульсная, кузнечная, прокаткой, газопрессовая, диффузионная, трением, ультразвуковая, холодная и др.

Физические и химические свойства твердых тел определяются их строением и природой межатомных связей, поэтому для получения соединения необходимо сформировать между свариваемыми поверхностями химические связи, аналогичные связям в твердых телах. Для установления механизма образования сварного соединения и принципов построения технологии сварки в твердой фазе необходимо знание природы и характера сил, действующих в свариваемых материалах.

В узлах кристаллической решетки твердых тел располагаются атомы (ионы), между которыми существуют химические связи – ионная, ковалентная, металлическая, силы Ван-дер-Ваальса.

В ионных кристаллах – в узлах решетки находятся ионы таким образом, что силы кулоновского притяжения между ионами противоположного знака больше, чем силы отталкивания между ионами одного знака.

Ионная связь обусловлена в основном электростатическим взаимодействием противоположно заряженных ионов.

Межатомные связи могут быть вызваны обобществлением валентных электронов. Такие связи называются ковалентными. Они возникают на основе обменного взаимодействия или обменного эффекта, обусловленного обменом атомов электронами и имеющего квантовую природу. Ковалентная связь имеет строго направленный характер. Все ковалентные связи, исходящие от данного атома, жестко связывают его с каждым другим атомом, образуя гигантскую молекулу. Пластическая деформация кристаллов с такими связями возможна только при повышенной температуре.

При образовании металлических кристаллов атомы сближаются на такое расстояние, когда волновые функции валентных электронов существенно   
перекрываются. Валентные электроны получают возможность переходить от одного атома к другому, поэтому валентные электроны принято называть коллективизированными. Металлическую связь в таких кристаллах можно представить как связь, возникающую вследствие действия сил притяжения между положительно заряженными ионами решетки и коллективизированными электронами, образующие так называемый электронный газ, оказывающий отталкивающее действие.

Все атомы, ионы, молекулы испытывают слабое взаимное притяжение, которое обусловлено силами Ван-дер-Ваальса. Источником этих сил является поляризационный эффект, вызываемый влиянием поля электронов, движущихся вокруг ядра одного атома на движение электронов вокруг ядра соседнего атома. Связь Ван-дер-Ваальса наиболее универсальная и возникает между новыми частицами, но это самая слабая связь, энергия которой на два порядка ниже энергии связи ионных и ковалентных кристаллов.

Процесс образования металлического соединения при холодной сварке в идеальном случае можно представить следующим образом. При сближении двух металлических элементов происходит коллективизация электронов, вылетающих с их поверхностей, в результате чего возникают силы взаимодействия между поверхностями. При достаточном их сближении образуется общее электронное облако и, следовательно, единый агрегат.

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

Поверхности реальных металлических тел представляют собой сложные системы, которые можно охарактеризовать геометрией рельефа и физико-химическим состоянием.

После механической обработки на поверхности металлов появляется макроскопическая (волнистость) и микроскопическая (шероховатость) геометрическая неоднородность. Микровыступы располагаются на волнистой поверхности, шаг которых может составлять от 1000 до 10000 мкм, а высота от нескольких мкм до нескольких десятков:

– черновая обработка резцом – 80 мкм;

– чистовая обработка резцом – 10 мкм;

– грубое шлифование – 6,3 мкм;

– полирование – 0,4 мкм;

– особо чистое полирование – 0,05 мкм.

При сближении таких поверхностей их контакт произойдет не по всей плоскости, а лишь в отдельных точках. Вследствие наличия микронеровностей действительная площадь поверхностей металла во много раз превышает площадь, замеренную обычными традиционными методами.

В верхних слоях металла сосредоточена значительная поверхностная энергия. Она обусловлена наличием некомпенсированных металлических связей, дислокаций, вакансий, что в совокупности с развитой поверхностью в микро- и ультрамикронеровности вызывает активное взаимодействие атомов металла, расположенных на поверхности, с внешней средой.

Над металлической поверхностью существует облако непрерывно движущихся электронов, покидающих металл и снова возвращающихся в него. Благодаря этому процессу поверхность металла покрыта двойным электрическим слоем: минус – облако электронов и плюс – дырки верхних слоев металла (за счет покинувших металл свободных электронов). Плотность энергии этого слоя непостоянна и зависит от микрогеометрии поверхности. Наибольший потенциал концентрируется на остриях микровыступов, поэтому они являются наиболее активными участками поверхности. Вследствие высокой активности поверхностных слоев металла поверхность его всегда покрыта окислами, жидкими и газовыми пленками.

Идеально чистая поверхность, свободная от окисных пленок и адсорбированных слоев жидкостных и газовых молекул, может быть создана в очень глубоком вакууме.

Время, необходимое для адсорбирования мономолекулярного слоя газа в атмосфере воздуха при 20 ºС и различном давлении, составляет:

давление, МПа 105 1,0 10–5

время, с 2,4·10–9 1,8·10–4 18

Молекулы кислорода, попадая на металл, расщепляются на атомы, химически взаимодействующие с металлом и образующие очень прочные направленные связи. Такой процесс называется хемосорбцией. Она в большинстве случаев сопровождается образованием оксидной пленки по реакции:

m·Me + 0,5·n·O2 = MemOn.

Поэтому поверхности металла мгновенно покрываются пленками окислов, а также адсорбированных молекул газа, воды и жировых веществ, что служит существенным барьером для получения качественного сварного соединения. Это связано с силами межатомного взаимодействия, которые перестают действовать уже на расстоянии порядка 1 нм. Кроме того, кислород насыщает связи поверхностных атомов металла. Полное удаление оксидов возможно только в процессе сварки, а не предварительной очистки. Газы, влага, органические загрязнения затрудняют сварку при комнатной температуре или нагреве до невысоких температур.

Существуют различные представления для объяснения сущности процессов сварки в твердой фазе: С.Б. Айнбиндер – пленочная гипотеза; А.Л. Семенов – энергетическая гипотеза; Паркс – гипотеза о рекристаллизации; Б.И. Костенко и И.П. Ивженко – деформационная гипотеза и др. Рассмотренные гипотезы освещают лишь отдельные стороны процесса сварки.

Сущность процесса соединения металлов в твердой фазе последовательно объясняется теорией, изложенной в работах Ю.Л. Красулина, М.Х. Шоршорова, Э.С. Каракозова и др. Согласно этой теории процесс характеризуется стадийностью топохимических реакций.

Различают три стадии процесса сварки:

1) образование физического контакта;

2) активация контактных поверхностей;

3) развитие объемного взаимодействия.

Однако это деление оправдано только для микроскопических участков контакта.

При сварке давлением осуществление процессов на стадиях происходит по-разному. Пластическое деформирование в зоне соединения может осуществляться с нагревом либо без нагрева. Процесс может протекать на воздухе или в контролируемой среде, а иногда он сопровождается взаимным перемещением свариваемых деталей – трением.

## 1.2. Холодная сварка

В начале 40-х годов XX в. некоторые исследователи утверждали, что причиной образования цельнометаллического соединения при холодной сварке является рекристаллизация металла. Они считали, что при значительных деформациях температура рекристаллизации снижается, а выделяемое при этом тепло достаточно для нагрева металла до этой температуры. Однако такие утверждения оказались несостоятельными, так как предложенная теория не в состоянии была объяснить целый ряд явлений, например, такие как теплоотвод из зоны контакта, а также время рекристаллизации.

В настоящее время принято следующее объяснение механизма образования соединения при холодной сварке. При сближении свариваемых поверхностей металлических деталей между ними возникают незначительные по величине гравитационные и межмолекулярные силы, однако их совершенно недостаточно для получения прочных связей. При сближении двух поверхностей происходит и поляризация электронов, так как известно, что металлы представляют собой конгломерат из ионов, находящихся в углах кристаллической решётки, и взаимодействие электронов с ионами создаёт связи между атомами металла и, таким образом, монолитное соединение между деталями.

Холодная сварка возможна лишь для тех металлов, которые имеют высокую пластичность, покрытые твёрдой и хрупкой плёнкой, и при деформировании таких металлов хрупкая плёнка разрушается, вытесняется из зоны контакта, освобождая чистую металлическую поверхность двух соединяемых деталей.

В зависимости от отношения твёрдости окисла к твёрдости металла, степень деформации, необходимая для получения прочного соединения, будет различна (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Критерии свариваемости пластичных металлов

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Металл | Пластическая  деформация, % | Отношение твердости окисла  к твердости металла |
| Алюминий | 60 | 4,5 |
| Кадмий | 84 | 1,5 |
| Свинец | 84 | 1,33 |
| Медь | 86 | 1,3 |
| Никель | 89 | 1,1 |

То есть основным критерием осуществления холодной сварки металлов является его пластичность и отношение твёрдости окисла и твёрдости металла. Органические вещества весьма эластичны и практически при любых деформациях не теряют сплошности, тем самым исключают возможность получения сварного соединения.

**Подготовка деталей к холодной сварке.** Основной целью предварительной подготовки деталей является наиболее тщательное освобождение соприкасающихся поверхностей свариваемых деталей от плёнок окислов и органических веществ, а оксидные плёнки разрушаются непосредственно при сварке. При этом лучшие результаты даёт механическая очистка вращающейся стальной щёткой. Химическое обезжиривание деталей не всегда даёт положительные результаты. При сварке алюминиевых деталей можно применять подготовку прокаливанием при температуре 350–400 ºС и свободном доступе воздуха (для полного выжигания адсорбированных на поверхности деталей органических плёнок).

Очищенные стальной щёткой, а также подготовленные прокаливанием детали не должны загрязняться. Даже незначительные загрязнения (отпечаток пальцев) могут сделать холодную сварку невозможной. Медные детали могут быть подготовлены к холодной сварке гальваническим никелированием. Никелированные детали необходимо предохранять от загрязнения. Перед сваркой поверхности этих деталей следует протирать чистой сухой ветошью. Хромировать детали с целью подготовки их к холодной сварке нецелесообразно, так как при сварке они дают заниженную прочность соединения.

**Технологические схемы сварки.** С помощью холодной сварки можно осуществлять соединения внахлёстку, встык и втавр.

При сварке внахлёстку применяются следующие схемы: сварка без предварительного зажатия деталей и сварка с предварительным зажатием деталей.

Недостатком при сварке без предварительного зажатия является то, что может происходить коробление деталей, т. е. рабочие выступы пуансона вдавливаются в металл и вызывают его течение. Без предварительного нажатия можно сваривать лишь детали малых толщин до 4 мм.

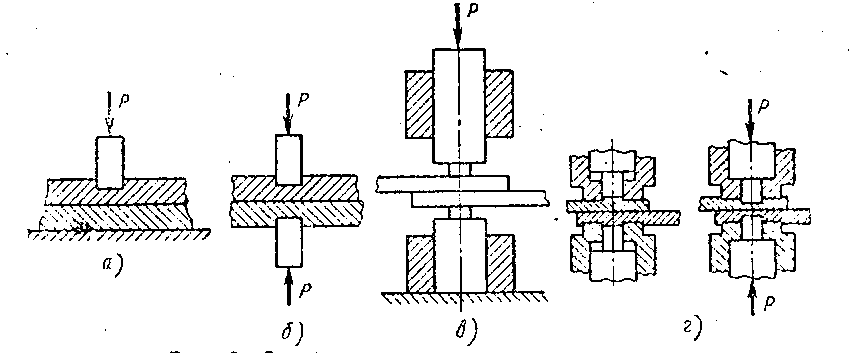


Рис. 1.1. Схемы холодной сварки:

*а –* одностороннее деформирование; *б –* двухстороннее деформирование;

*в –* двухстороннее (пуансоны с заплечиками);   
*г –* двухстороннее с периферийной зоной обжатия

При сварке с предварительным зажимом прочность на 20 % выше, причем она зависит от величины деформации свариваемых деталей.

Пуансоны, как правило, должны иметь заплечики, наличие их улучшает образование соединения по периферии пятна.

Сварное соединение получается не только непосредственно под пуансоном, но и по периферии пятна. Соединение внахлёстку выполняется как точками, так и непрерывным швом, при этом ширина и диаметр пуансона определяются в зависимости от толщины свариваемого металла из соотношения   
b = (1–3) δ.

Сварка внахлёстку может производиться как с двухсторонним, так и с односторонним деформированием. Если одна из сторон свариваемых деталей должна оставаться гладкой, то в этом случае желательно применять сварку с односторонней деформацией. При этой схеме сварки максимальная прочность соединения наступает при вдавливании пуансона на 55 % от суммарной толщины изделия.

**Шовная контактная сварка.** Кроме точечных соединений и линейных швов ограниченной длины с помощью холодной сварки можно получать швы и неограниченной длины, при этом деформирование металла осуществляется вдавливанием в него рабочего выступа вращающихся роликов.

Однако прямолинейный непрерывный шов вследствие значительного уменьшения сечения по всей длине соединяемых деталей сильно снижает прочность сварного соединения. Применение находит этот метод при сварке по отбортовке.

Скорость вдавливания пуансонов в металл при холодной сварке на прочность соединения влияния не оказывает. Опыты показывают, что прочность не меняется, если нагрузка прикладывается ударно, или если скорость составляет 0,02 мм/сек. (медленное сжатие). Этот факт ещё раз подтверждает то, что холодная сварка не связана с тепловыми эффектами.

**Сварка встык.** При стыковой сварке соединяемые детали закрепляются в специальных, расположенных соосно, зажимах.

Считается, что при заострённых зажимах усилие сжатия меньше, чем при сварке с плоскими зажимами: для Al в 1,8 раза, Cu в 1,5 раза.

Применение различных конструкций зажимов отражает различные мнения исследователей. Авторы заостренных зажимов считают, что металл в плоских зажимах плохо «течет» при его деформации от центра к периферии. Другие авторы (академик Хренов) считают, что «течение» металла должно быть затрудненным, и для этого в зажимах делают кольцевые углубления, которые заполняются вытесненным металлом и после сварки на деталях остаются в виде выступов. При использовании плоских зажимов выдавливаемый из стыка металл губками расплющивается, что требует дополнительного усилия сжатия.   
А при использовании заострённых зажимов выдавливаемый металл-грат срезается.

**Технологические параметры сварки.** При изучении влияния встык усилий того или иного технологического параметра на качество соединения выбираются критерии качества сварки. Соединения, полученные с помощью холодной сварки, испытываются на растяжение, а также на статический и динамический изгиб. Исследования процесса холодной сварки показали, что основным параметром технологического процесса является степень пластической деформации.

При сварке внахлёстку деформацию определить просто, при сварке же встык возникает ряд трудностей, так как неизвестно по отношению к какой длине определить величину деформации. Ряд исследователей степень деформации при сварке встык определяют отношением разности между общей длиной свариваемых концов, выступающих из губок, до сварки h0 и длиной концов этих образцов после сварки hk к общей длине их до сварки:

.

Однако размеры h0 являются произвольными. Считается также, что степенью деформации является длина выпущенного из зажимов свободного конца свариваемого образца, которая полностью должна быть при сварке деформирована, т. е. выдавлена из зоны сварки и срезана.

Экспериментально установлено, что длина выпущенного из зажима конца в таком случае должна быть: для Al – (1–1,2)d; Cu – (1,2–1,8)d; Pb – (0,9–1,0)d;   
Ag – (1,5–1,6)d. Кроме того, при больших (>15 мм) диаметрах выпуск должен быть не более половины d.

**Усилие зажатия и осадки.** Величина усилия зажатия деталей в губках должна составлять не менее 0,8 от усилия осадки, а усилие осадки для различных губок является различным. Для зажимов с углублением величина усилия осадки при сварке алюминия диаметром 1–8 мм составляет 250–180 кг/мм2, а для сварки меди диаметрами 0,8–5 мм – 800–650 кг/мм2.

Для плоских губок при сварке алюминия Pос=160–200 кг/мм2 и для заострения губок усилие осадки равно: для алюминия – 70–80 кг/мм2, меди –   
200–250 кг/мм2 при сварке меди с алюминием – 150–200 кг/мм2.

Перед сваркой изделий встык зачищаются только торцы деталей. Если сваривают проволоку, то концы просто откусывают кусачками или специальными ножницами.

Механические свойства соединений можно изменять с помощью термообработки. В связи с тем, что скорость приложения нагрузки в процессе сварки на прочность соединения практически влияния не оказывает, то производительность холодной сварки может быть достаточно высокой.

**Оборудование.** Для холодной сварки могут быть использованы практически любые пресса. Однако сейчас разработан (во ВНИИЭСО) ряд промышленных установок и полуавтоматов, а также различных приспособлений.

Например, установка УГХС-5 предназначена для точечной сварки алюминиевых шин толщиною 5+5 мм в монтажных условиях. На ней можно сваривать и любые другие детали. Как в стационарных, так и в монтажных условиях сварка выполняется внахлёстку. Установка пневмогидравлическая, управляется с пульта. Усилие при сварке – 5 тонн, производительность – 400 сварок в час, расход воздуха на одну сварку – 0,012 м3, имеются выносные клещи 7 кг, вес установки 120 кг.

Эксплуатируется установка МХСА-50, предназначенная для армирования алюминиевых шин и других деталей медными обкладками. Производительность – 300 сварок в час. Усилие – 50 тонн, ход рабочего штока – 10 мм, расход воздуха – 10 м3 в час. Вес – 240 кг.

Имеется установка МХСК-1 для сварки алюминиевых корпусов конденсаторов с крышками. Корпуса могут быть круглого D = 50 мм и прямоугольного сечения 45×45 мм. Производительность машины 750 сварок в час.

Разработан ряд клещей, например КС-6, предназначенных для ручной сварки проводов встык.

Имеются машины для сварки троллейных проводов, например машина МСХС-60 может сваривать алюминиевые стержни сечением до 700 мм2 и медных до 250 мм2. Осадочное усилие машины составляет 60 тонн, а максимальное 90 тонн.

**Холодная сварка сдвигом**. В последнее время предложено холодную сварку осуществлять путём сдавливания деталей с одновременным тангенциальным сдвигом. При сварке сдвигом механизм образования сварного соединения несколько иной. При простой сварке поверхности свариваемых деталей деформируются незначительно. При приложении же тангенциального перемещения происходит активное удаление (сдирание) оксидных плёнок и загрязнений с образованием достаточно большой площади, очищенной от окисных и жировых пленок при сравнительно небольшой деформации металла. Основными параметрами при холодной сварке сдвигом является величина удельного давления и величина сдвига. Удельное давление должно быть максимальным, но достаточным для осуществления относительного перемещения свариваемых поверхностей. Например, достаточным перемещением поверхностей, обработанных перед сваркой напильником, является сдвиг на 5–7 мм.

**Области применения холодной сварки**. Холодная сварка находит широкое применение в промышленности. Сваривают самые различные изделия из алюминия – оболочки кабелей, корпуса полупроводников, конденсаторов.

В 1951 году на Ленинградском заводе «Электрик» было налажено серийное производство алюминиевых электрочайников, полностью изготовляемых с помощью холодной сварки. При этом применялась шовная сварка и внахлест.

В больших масштабах применяется сварка меди с алюминием. Холодная сварка применяется при изготовлении теплообменников, при этом на поверхность алюминиевых листов наносят краской рисунок будущих трубок, затем

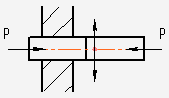
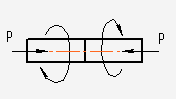
2 листа сваривают, а после сварки пропускают под давлением масло, в участках, где была краска, металл раздается под давлением, и формируются трубки.

Можно ещё перечислять случаи применения холодной сварки. Однако области её применения ещё не определились. Можно полагать, что в будущем она найдёт ещё большее применение.

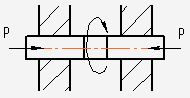
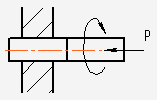
## 1.3. Сварка трением

Способ предложен в 1959 году. Процесс образования соединения происходит в твердом состоянии при воздействии тепла, возникающего при трении поверхностей свариваемых деталей. Трение свариваемых деталей осуществляется, как правило, вращением и сжатием с определенным усилием деталей. Существует несколько схем сварки трением (рис. 1.2).

Соединение происходит за счет образования металлических связей   
на чистых контактирующих поверхностях. Различные пленки и другие загрязнения удаляются из зоны сварки вследствие значительной пластической деформации. Требуемые деформации получаются за счет усилия осадки. Тепло в процессе трения генерируется локализовано в приповерхностных слоях свариваемых деталей.

*а* *б*

*в* *г*

Рис. 1.2. Схемы процесса сварки трением

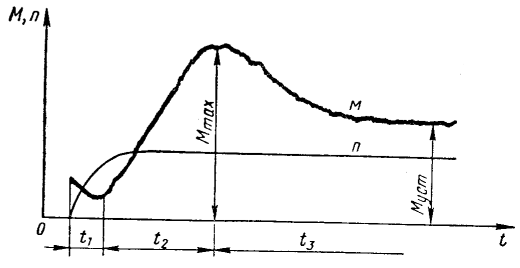


Рис. 1.3. Зависимость выделения тепла от времени

Интенсивность выделения тепла (рис. 1.3) в процессе сварки непостоянна.

Процесс нагрева условно может быть разделен на следующие фазы:

t1 – в первой фазе имеет место граничное трение, переходящее в сухое, при этом коэффициент трения мал, мощность трения также незначительна, а схватывания между контактирующими поверхностями единичны.

t2 – в этой фазе наблюдается быстрое нарастание мощности и значительный рост температуры.

t3 – третья фаза наиболее длительная (80 % времени), количество тепла в основном выделяется в это время (90 %), температура при этом выравнивается по всему стыку, а потребляемая мощность уменьшается за счет повышения температуры металла. При установившейся мощности, по-видимому, процесс сварки можно прекращать.

Основные параметры процесса сварки трением:

1. v – cкорость относительного вращения свариваемых поверхностей.
2. p – величина удельного давления, прилагаемого к свариваемым поверхностям.
3. F – величина пластической деформации, мерой которой может служить величина осадки.

При сварке трением весьма важным является мгновенное прекращение движения (вращения). Иногда в конце вращения необходимо прикладывать повышенное давление (проковка). Различные побочные факторы – начальное состояние поверхности (жировые пятна, оксидные пленки, чистота обработки, состояния боковых поверхностей свариваемых деталей), индивидуальные качества сварщика на процесс сварки влияния не оказывают. Затраты энергии в 5–10 раз меньше, чем при контактной сварке, а процесс легко автоматизируется.

**Характеристика сварного соединения.** Если режим сварки был подобран правильно, то шов обладает хорошей сплошностью – поры, инородные включения, макродефекты отсутствуют.

При испытаниях на растяжение образцы разрушаются по основному материалу, т. е. шов прочнее основного металла. Это происходит за счет своеобразной термомеханической обработки в зоне шва. И металл в зоне шва имеет мелкокристаллическую структуру и наклеп.

Одним из важных преимуществ сварки трением является то, что характер окружающей среды не оказывает влияния на прочность получаемых сварных соединений.

**Рекомендации по выбору технологических параметров.** Параметры режима сварки зависят от свойств свариваемого материала и конфигурации изделия.

Для выбора оптимальной частоты вращения используют эмпирические зависимости:

для черных металлов nds = (0,3…0,6)·103 мм/с (V = 1…2 м/c);

для Al, Сu nds = (0,6…0,75)·103 мм/с (V = 2 м/с);

для титана nds = (8…10)·103 мм/с (V = 4…5 м/c);

где ds – диаметр заготовки в месте сварки, мм.

Окружная скорость:

V = πdsπ·103.

Обычно давление осадки или проковки Рос и давление нагрева связаны зависимостью Рос = (2–3)Рн.

Экспериментальные исследования показывают, что при выборе значения удельного давления можно использовать следующие рекомендации.

При сварке заготовок сплошного сечения:

n = 16,6 c–1, ds = 40·100 мм, Рн = 50 МПа, Рос = 120 МПа.

Для трубных заготовок:

n = 6,6 м/с, ds = 40…160 мм, Рн = 50 МПа, Рос = 100 МПа.

В настоящее время накоплен достаточный экспериментальный материал и в литературе приведены режимы сварки трением широко распространенных материалов.

Сваркой трением можно получать соединения самых различных по   
теплофизическим и механическим свойствам материалов – Cu + Fe, Cu +   
сплав Ковар, Al + Ti, Cu + Al и т. д.

При оценке качества соединения используют разрушающие и неразрушающие методы контроля.

К первым относятся механические испытания, технологические пробы, металлографические исследования и при необходимости, коррозионные испытания.

Ко вторым относятся УЗК – определение таких дефектов, как несплошность, а также определение их размеров и распределением по сечениям.

Во многих случаях качество соединения может быть обеспеченно контролем технологических параметров.

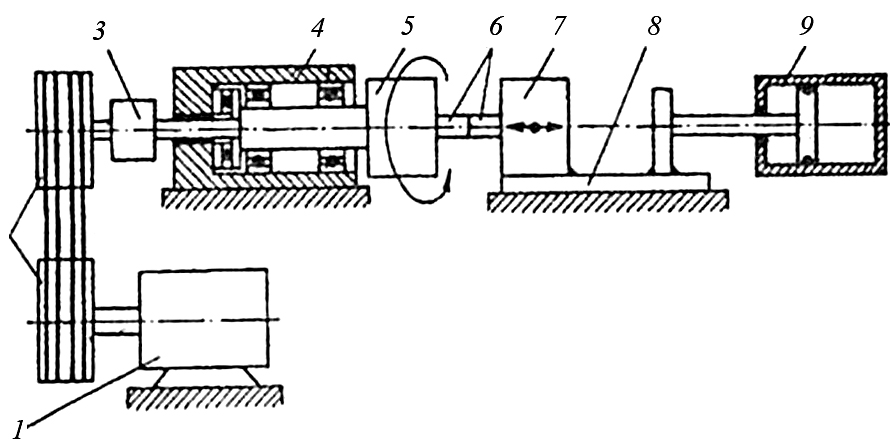
**Оборудование.** Для сварки трением требуется специальное оборудование, рассчитанное на большие скорости и большие осевые нагрузки. Оно   
должно обладать высокой прочностью, воспринимать значительные радиальные колебания и т. д. Обычные металлорежущие станки этим требованиям не отвечают.

Машины для сварки трением обычно содержат в себе следующие основные узлы (рис. 1.4): привод вращения шпинделя 1 с ременной передачей 2; фрикционную муфту 3 для сцепления шпинделя с приводным устройством; тормоз 4 для торможения шпинделя; два зажима для крепления свариваемых заготовок *7*; переднюю бабку *5* со шпинделем, несущим на себе вращающийся зажим 6; заднюю бабку 8 с неподвижным зажимом; пневматические или гидравлические цилиндры 9, обеспечивающие создание необходимого рабочего (осевого) давления машины; пневматическую, пневмогидравлическую или гидравлическую схему управления силовым приводом машины; шкаф управления.

В большинстве машин в состав привода вращения входят трехфазный асинхронный электродвигатель, клиноременная передача с зубчатым ремнем.

В машинах для микро- и прецизионной сварки, шпиндель которых должен развивать очень высокую частоту вращения (80–650 с–1), в качестве привода используются пневматические турбинки, которые характеризуются быстрым разгоном и торможением. Они позволяют обходиться без ременной передачи вследствие непосредственного сочленения вала со шпинделем машины.

В качестве муфт сцепления находят применение электромагнитные многодисковые, гидравлические и пневматические. При торможении шпинделя участвуют силы трения в стыке между свариваемыми заготовками и специального тормозного устройства. Известны способы торможения с помощью реверсивного двигателя фрикционных (электромагнитных, пневматических или гидравлических) и дисковых тормозов.



***2***

Рис. 1.4. Принципиальная конструктивно-кинематическая   
схема машины для сварки трением

Вращающийся зажим обычно выполняют в виде трехкулачкового сменного патрона.

Кулачки сменные, каждая группа кулачков рассчитана на закрепление заготовок в узком диапазоне диаметров (2–3 мм). Машины комплектуются несколькими такими группами кулачков.

Неподвижный зажим снабжен парой (в некоторых машинах двумя парами) сменных кулачков. Для обеспечения соосности свариваемых заготовок в зажимах нужно, чтобы все кулачки перемещались синхронно.

Для надежного закрепления заготовки, предотвращающего ее прокручивание, при сварке сумма радиальных усилий, действующих со стороны кулачков на боковую поверхность заготовки, должна быть не менее четырехкратной величины максимального осевого усилия машины.

Всё промышленное оборудование для сварки трением можно разделить на две группы: универсальное и специализированное. Специализированное предназначено для сварки одной детали или группы однотипных деталей, размеры и материал которых заранее известны при проектировании машин.   
В большинстве случаев это машины-автоматы или полуавтоматы, рассчитанные на эксплуатацию в условиях массового или крупносерийного производства. Такие машины обычно изготавливают в одном-двух экземплярах или небольшими партиями.

Серийно выпускаются универсальные машины, характеристики которых представлены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Технические характеристики оборудования для сварки трением

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Параметр | Тип машины | | | |
| МФ-327 | МФ-362 | МСТ-120-02 | МСТ-120-03 |
| Номинальная мощность, кВт | 10 | 10 | 200 | 160 |
| Максимальное осевое усилие, кН: |  |  |  |  |
| при проковке, | 50 | 50 | 1200 | 1200 |
| при нагреве | 50 | 50 | 450 | 450 |
| Частота вращения шпинделя, с–1 | 25 | 25 | 5 | 6 |
| Диаметр свариваемых заготовок, мм | 10–22 | 10–22 | – | 73–168 |

**Новые виды сварки трением.**

**Инерционная сварка.** Это процесс, при котором энергия, потребляемая от источника в промежутках между сварками, сначала накапливается во вращающихся массах (маховиках), а затем в процессе сварки преобразуется в тепло. Инерционная сварка начинается с разгона одного или нескольких маховиков, соединенных с приводом через электромагнитную муфту. При накоплении энергии в маховике, раскрученном до определенной угловой скорости, муфта отключается, детали сжимаются, и начинается интенсивное тепловыделение.

Скорость маховика в процессе превращения накопленной в нем кинетической энергии в тепловую падает до нуля. Давление в течение всего цикла сварки может оставаться постоянным или при снижении угловой скорости маховика до заданного значения (или в момент его полной остановки) увеличиваться.

При инерционной сварке резко уменьшается расход энергии, хотя удельная мощность (23–174 Вт/мм2) значительно выше, чем при обычной   
(12–47 Вт/мм2). Число оборотов изменяется от 25 до 85 с–1, давление до торможения 20–100 МПа, а при торможении за 0,2–0,5 с оно повышается иногда до 250 МПа.

**Орбитальная сварка.** Это сварка позволяет соединять детали некруглого сечения, а также заранее сориентированные между собой детали.

Обе свариваемые заготовки во время сварки вращаются синхронно и синфазно, а трение между ними возникает в результате взаимного смещения осей вращения, которые при этом остаются взаимно параллельными. Схема орбитальной сварки трением приведена на рис. 1.5.

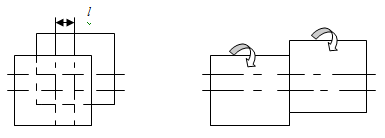


Рис. 1.5. Схема процесса орбитальной сварки

Оси заготовок смещены одна относительно другой на величину орбитального радиуса *l*, обеспечивающего относительное движение.

При орбитальной сварке деталей, например, сечением 650 мм2 орбитальный радиус составляет 3 мм. При увеличении значений *l* во время сварки будет иметь место периодическое «оголение» периферийных областей контактных поверхностей, что может привести к их окислению. Выбор основных параметров режимов орбитальной сварки аналогичен выбору параметров обычной сварки трением.

**Наварка.** Процесс сварки трением с успехом используется также для восстановления изношенных деталей. Так как при этом не происходит расплавления металла, то правильнее применять в данном случае термин «наварка», а не «наплавка».

## 1.4. Сварка взрывом

Процесс сварки взрывом (рис. 1.6) определяется следующими факторами: скоростью метания пластины Vн, углом соударения γ, давлением, длительностью соударения, температурой в зоне соударения.

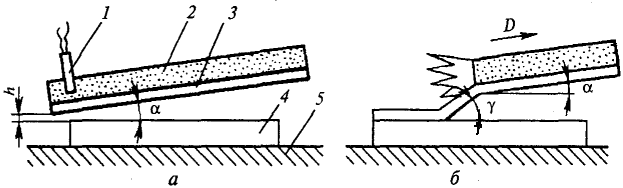


Рис. 1.6. Угловая схема сварки взрывом до начала (*а*) и в стадии взрыва (*б*):   
*1* – детонатор; *2* – заряд вещества; *3*, *4* – свариваемые заготовки; *5* – жесткое основание;   
*α* – угол между пластинами; *h* – наименьшее расстояние

Технологическими параметрами являются: скорость детонации D; безразмерный параметр r, представляющий собой отношение r = Швв/Шна; величина зазора h.

При дозвуковой скорости D < Co на поверхности металла успевает развиться пластическая деформация. При D ≥ Co она не успевает развиться, что приводит к появлению трещин в металле.

При очень высокой скорости V в облицовочной верхней пластине и в основной нижней пластине возможно образование трещин под действием ударных волн и отражённых волн. Для сварки сталей рекомендуемая Vн лежит в пределах 500…700 м/с.

В практически применяемом диапазоне режимов сварки *r* = 0,6…4,2,   
Vн = (0,16…0,25)D.

Скорость соударения зависит от величины зазора h, если h=0, то Vн=0 и сварка, как правило, не происходит.

Скорость детонации D определяется током взрывчатого вещества (ВВ), его плотностью и толщиной слоя. В гомогенных зарядах скорость деформации растёт с увеличением плотности по линейному закону. ВВ выбирают таким, чтобы скорость деформации была меньше скорости звука в соединяемых металлах и находилась в диапазоне от 1500 м/с до Co (скорость звука в металлах). Co в Аl – 6200 м/с, в стали – 5900 м/с, Cu – 4700 м/с, а скорость детонации различных сортов аммонитов находится в пределах от 2500 до 6000 м/с, аммиачной селитры 1800 м/с. В зарубежной и отечественной практике в качестве ВВ применяют игданиты – смесь аммиачной селитры с дизельным топливом.   
С увеличением содержания дизтоплива скорость детонации падает.

Скорость детонации при сварке взрывом определяет нормальную скорость Vн , развиваемую метаемой пластиной, и давление в очаге сварки при соударении пластин. При недостаточной Vн соединение получается непрочным или провар может отсутствовать полностью.

Взрыв заряда инициируют при помощи детонатора *1*, расположенного над вершиной угла, образуемого свариваемыми деталями. Взрывчаткой может служить сыпучий гексоген (триметилентринитрамин – С3Н6О6N6) плотность   
1,2 г/см3, скорость детонации D < 6600 м/с и давление при взрыве –   
130000 атм. После инициирования взрыва, вдоль слоя *2* распространяется плоская детонационная волна со скоростью 6600 м/с. В процессе взрыва в верхней пластине в результате давления возникает импульс, направленный нормально к первоначальному положению пластины.

Под действием сил инерции и скорости D элементы пластины последовательно приобретают скорость V и подходят к поверхности детали *4* под углом α. Пластина, перемещаемая зарядом, может приобрести скорость равную 2000 м/с. Эта скорость может быть разложена на нормальную и касательную. Нормальная составляющая вызывает большие давления, так при Vп = 2000 м/с Р = 34000 атм. Длительность воздействия давления мала и находится из выражения:

,

где b – толщина пластины; С – скорость звука в металле пластины.

Для b = 2 мм, t = 10–6 с.

Подход верхней пластины и нижней под углом α вызывает образование струи, очищающей поверхность свариваемых пластин.

Если же пластины располагать параллельно, то, несмотря на изменение расстояния h и увеличение заряда, сварка между пластинами не происходит. Образование соединения равнопрочному основному материалу наступает при   
α = 2–4о и h = до 5–10 мм. Основную роль в образовании сварного соединения играет взаимное тангенциальное перемещение пластины.

При испытании сваренных образцов, разрушение их происходит по основному металлу. При замерах микротвёрдости выяснилось, что твёрдость в зоне соединения и околошовной зоне значительно выше, чем в основном металле.

Упрочнение зоны соединения происходит вследствие высокой степени деформации тонких поверхностных пластин. Упрочнённая зона имеет мартенситообразную игольчатую структуру.

В соединении между сварными материалами отсутствуют оксидные плёнки и другие неметаллические включения, они уносятся кумулятивной струёй.

Граница соединения вдоль пластин представляет волнистую линию. Практически мгновенная скорость процесса говорит о том, что диффузионные процессы не протекают.

Одним из основных технологических условий, во многом определяющих качество соединения, является выдерживание исходного сварочного зазора. Сварка с нулевым зазором практически невозможна. Особенно актуально это условие при плакировании больших поверхностей тонкими листами (1–5 мм). Сварочный зазор может быть обеспечен подвешиванием верхнего листа на тесемках и проволоке, а также путем использования металлических шариков, прокладок, спиралей, тонких металлических гофрированных пластинок, нанесением на одной из поверхностей механической обработкой острых зубцов. Широкое практическое применение при плакировании крупногабаритных листов получили V-образные металлические опоры, изготовленные из листа толщиной 0,1–0,2 мм. Зазор между листами перед началом процесса может быть создан за счет нагнетания между ними сжатого газа (избыточное давление   
4–10 Па), не вступающего в химическое взаимодействие со свариваемыми металлами, но определенная трудность при этом связана с герметизацией зазора.

Для повышения жесткости тонких металлических листов (фольг), необходимой для создания и выдерживания зазора, их крепят любым способом (например, точечной сваркой) к металлической пластине. А чтобы они не сварились между собой при взрыве, между ними наносят тонкий слой смазочного материала.

Поверхность плакирующего листа, находящегося в контакте с зарядом ВВ, может повреждаться вследствие бризантного (детонационного) действия заряда. Для защиты поверхности рекомендуется между зарядом и плакирующим листом помещать буферный слой, например, из полиэтилена, линолеума, резины.

Сварка взрывом дает возможность сваривать практически любые металлы. Однако последующий нагрев сваренных заготовок может вызвать интенсивную диффузию в зоне соединения и образование интерметаллидных фаз, что приводит к снижению прочности соединения. И при достаточно высоких температурах она может уменьшиться практически до нуля.

Для предотвращения этих явлений сварку взрывом проводят через промежуточные прослойки из металлов, не образующих химических соединений со свариваемыми материалами. Например, при сварке титана со сталью используют в качестве промежуточного материала ниобий, ванадий или тантал.

Сварка взрывом применяется для плакирования стержней и труб внутренних и наружных поверхностей, а также цилиндров и цилиндрических изделий.

При плакировании стержней трубу *1* (рис. 1.7, *а*) устанавливают с зазором на стержень *2*. Внутреннюю поверхность трубы и наружную поверхность стержня механически обрабатывают и обезжиривают. На наружную поверхность трубы помещают заряд взрывчатого вещества *3*, инициирование (возбуждение) которого осуществляется по всему сечению одновременно так, чтобы взрыв распределялся по заряду нормально его оси. Для создания такого фронта используют конус из ВВ с детонатором *4* в его вершине. Для изоляции зазора от продуктов детонации и центрирования трубы относительно стержня в верхней ее части устанавливают металлический конус *5*. В случае плакирования трубных заготовок (рис. 1.7, *б*) внутрь их устанавливают стержень *2*. Толщина плакирующей трубы может быть от 0,5 до 15 мм, а диаметр теоретически не ограничивается.

При плакировании внутренних поверхностей используют схему (рис. 1.7, *б*), предусматривающую размещение плакируемой трубы *1* в массивной матрице *2*. Внутрь трубы *1* с зазором устанавливают плакирующую трубу *3* с зарядом   
ВВ *4*, инициируемого детонатором *5*.

Для внутреннего плакирования крупногабаритных труб и цилиндрических изделий ответственного назначения применяют вместо массивной матрицы *2* дополнительный заряд, расположенный на наружной поверхности плакируемого цилиндра и взрываемый одновременно с внутренним зарядом.

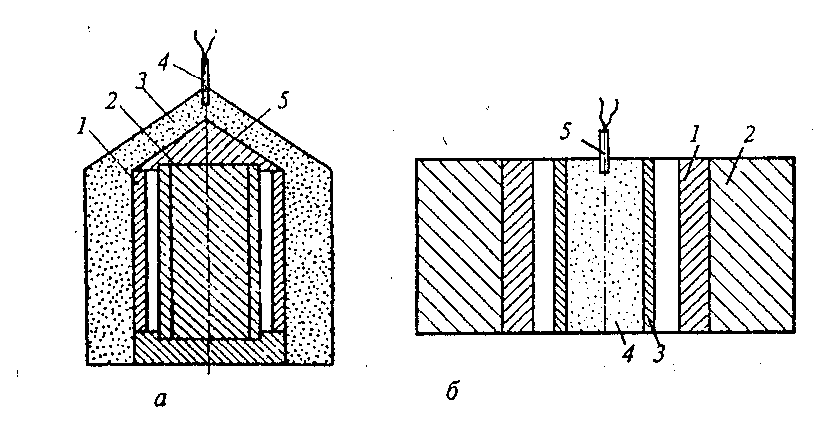


Рис. 1.7. Схемы плакирования взрывом стержня (*а*) и внутренней поверхности трубы (*б*)

Эффективным процессом соединения тонких листов внахлестку является точечная сварка, осуществляемая по схеме, показанной на рис. 1.8.

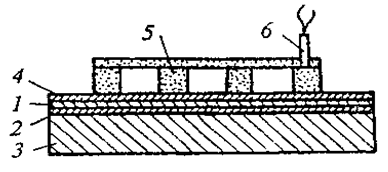


Рис. 1.8. Точечная сварка взрывом

Свариваемые листы *1* и *2* собирают на опоре *3*. На верхний лист устанавливают через буферную прокладку *4* цилиндрический заряд ВВ *5*, взрываемый детонатором *6*. После взрыва образуется соединение в виде кольца, внутренний диаметр которого несколько меньше наружного диаметра заряда.

В ряде случаев при сварке пластин используют схему, при которой перед сваркой отгибают конец метаемой пластины (рис. 1.9).

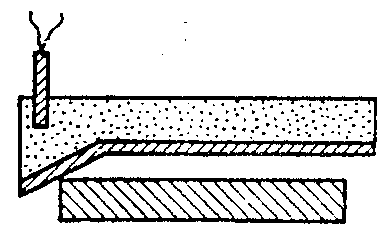


Рис. 1.9. Схема сварки с отгибом пластины

Отгиб осуществляют на длине 100–150 мм под углом 2°. Сварочный зазор на участке параллельного расположения метаемой пластины и основания составляет 6–8 мм. Эта схема сварки позволяет сохранить постоянство параметров процесса по всей облицовываемой поверхности, что обеспечивает более стабильное качество соединения по сравнению с угловой схемой.

В современных процессах металлообработки взрывом применяют заряды ВВ массой от нескольких граммов до сотен килограммов. Большая часть энергии, выделяющаяся при взрыве, излучается в окружающую среду в виде ударных волн, сейсмических возмущений, разлета осколков. Воздушная ударная волна – наиболее опасный поражающий фактор взрыва. Поэтому сварку взрывом проводят на полигонах (открытых и подземных), удаленных на значительные расстояния от жилых и промышленных объектов, и во взрывных камерах.

Преимуществом работы на открытых полигонах является возможность соединения заготовок взрывом практически неограниченных габаритов.

## 1.5. Высокочастотная сварка

При высокочастотной сварке выделение тепловой энергии происходит в массе нагреваемого металла и в основном в поверхностных слоях вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости. Наибольшая плотность тока наблюдается в поверхностных слоях. Увеличение плотности тока от центра к поверхности проводника происходит по экспоненциальному закону.

,

где  – среднеквадратичное значение плотности тока на расстоянии  от поверхности провода, А/м2;

 – среднеквадратичное значение плотности тока по поверхности провода;

 – глубина проникновения – расстояние от поверхности провода по направлению к его центру, на котором плотность тока убывает в «*е*» раз по сравнению с плотностью тока на поверхности.

Поэтому в поверхностных слоях могут появляться высокие плотности тока и быстрый нагрев металла.

Для сварки используется и эффект близости. Сущность его следующая: если вблизи проводника с переменным током поместить другой проводник с током или без тока, то во втором проводнике будет наводиться ЭДС, противоположная первому. А магнитные потоки от обоих токов в зазоре между проводниками будут направлены в одну сторону и суммироваться, а на наружных участках проводников будут ослаблять друг друга.

Поэтому в зазоре между проводниками напряженность магнитного поля повышается, плотность токов и поглощение энергии в этих местах увеличивается, т. е. во внутренних поверхностных слоях проводников энергия значительно концентрируется. В практике сварка труб с использованием эффекта близости и поверхностного эффекта представлена на рис. 1.10.

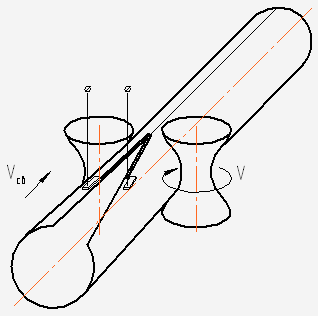


Рис. 1.10. Схема высокочастотной сварки труб с контактным нагревом

Шунтирующее сопротивление при высокой частоте важно и его можно увеличить, помещая внутрь трубы металлический сердечник.

Можно применять токи разночастотного диапазона и получать очень высокую концентрацию энергии.

Стыковая сварка труб выполняется с использованием индуктора, изготовленного в виде круга из одного витка (рис. 1.11).

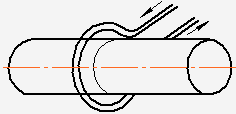


Рис. 1.11. Схема высокочастотной стыковой сварки труб с индукционным   
подводом тока

При нагреве стыков труб до сварочных температур их сжимают. Частота тока подбирается исходя из максимального КПД индуктора и возможно более высокой скорости нагрева. Критерием выбора частоты тока является диаметр трубы и толщина ее стенки:

,

где *f* – частота, Гц;

*d* – диаметр трубы, см.

С помощью высокочастотного нагрева можно производить наплавку твердым сплавом на режущую кромку различных инструментов, например зубьев буровых долот, токарных резцов и т. д.

Преимущества сварки с нагревом:

1) возможность сварки труб из высокоактивных материалов: аустенитных и жаропрочных сталей и сплавов;

2) прочность сварных соединений не уступает прочности основного металла;

3) высокая производительность и стабильность процесса;

4) нечувствительность к состоянию поверхности металла;

5) процесс легко механизируется и автоматизируется.

## 1.6. Диффузионная сварка в вакууме

**Физические основы метода.** Диффузионная сварка осуществляется в твердом состоянии металла при повышенных температурах с приложением сдавливающего усилия к месту сварки (рис. 1.12). Процесс условно можно разделить на две стадии.

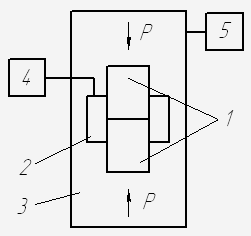


Рис. 1.12. Схема диффузионной сварки:

*1* – свариваемые детали; *2* – нагревательное устройство;

*3* – вакуумная камера; *4* – источник питания

нагревательного устройства; *5* – вакуумный насос

На первой стадии, на линии раздела двух деталей, создаются условия для образования металлических связей. Для этого, например, при холодной сварке с поверхности необходимо удалить оксидные пленки и жировые слои. При диффузионной сварке использование высоких температур приводит к уменьшению сопротивления материала пластическим деформациям, что облегчает сближение атомов металла по всей площади свариваемой поверхности. Облегчение удаления поверхностных пленок и предупреждение их образования при сварке использованием вакуумной защиты и тщательной предварительной защитой деталей.

На второй стадии происходят процессы взаимной диффузии атомов свариваемых материалов. Эти процессы приводят к образованию промежуточных слоев, приводящие к увеличению прочности соединения.

Подготовка поверхности изделия под сварку является одним из важных моментов в процессе диффузионной сварки. От адсорбированных слоев освобождаются путем невысокого нагрева. Сильным нагревом в защитных средах можно испарить и оксидные пленки. Однако важным является не только удаление, но и предотвращение появления пленок. С этой точки зрения защита любыми инертными газами менее эффективна, чем вакуум.

Если химически чистый аргон содержит О2 = 0,05 % и N2 = 0,23 %, то при вакууме 1 мм рт. ст. О2 = 0,03 % и N2 = 0,1 %.

Если вакуум 1·10–4 мм рт. ст., то О2 = 0,00013 % и N2 = 0,1 %. Чем больше в сталях содержится активных элементов, тем выше должен быть вакуум при сварке. При высоком вакууме очищается от газов и сам металл, и механические свойства его поверхностных слоев повышаются.

**Сжимающее усилие соединяемых поверхностей.** Основные назначения усилия – вызвать микропластическую деформацию, создать максимальный контакт между поверхностями соприкосновения. Оставшиеся между гребенками неровностей микропустоты будут «зарастать» в процессе взаимной диффузии. Давление практически не приводит к возникновению макроскопической пластической деформации, и размеры свариваемых деталей не изменяются.   
Не изменяются механические и физико-химические свойства. Величина давления колеблется от 0,1 кг/мм2 до 5 кг/мм2 (для цветных металлов). Создание давления осуществляется различными способами: 1) созданием давления посредством термического натяжения; 2) пневматическим давлением; 3) давлением пуансоном и др.

Нагрев соединяемых материалов и изотермическая выдержка служит для полного протекания диффузионных процессов. При повышении температуры материалов большая часть тепловой энергии, поглощаемой ими, расходуется на увеличение энергии колебания атомов и тем самым увеличением вообще диффузии на свариваемых границах. Свариваемые детали могут нагреваться различными способами. Применяются на практике радиационный, электроконтактный, индукционный нагрев, электронным лучом, в поле тлеющего разряда (обусловленный преобразованием кинетической энергии положительных ионов в тепловую при бомбардировке катода), при этом сварку проводят в контролируемой атмосфере. Термическая выдержка при сварке может колебаться в широких пределах от нескольких минут до нескольких часов.

**Оборудование.** В настоящее время разработан ряд установок для сварки в вакууме. Все они называются СДВУ с добавлением цифр.

Установки включают в себя устройства и приборы, служащие для получения и сохранения вакуума. Вакуумная сварочная камера, источник нагрева деталей, устройство с гидросистемой, служащей для создания давления, и различные контролирующие приборы.

В настоящее время создано более 40 типов установок. Внедрено около 450 установок. Сварено 400 различных композиций металлов и керамик.

## 1.7. Сварка прокаткой

Сварка прокаткой – высокопроизводительный процесс для получения биметаллов из однородных и разнородных металлов и сплавов для производства многослойных листов, полос, лент, фасонных профилей, прутков, проволок.

Соединение компонентов биметалла происходит при их совместной горячей или холодной пластической деформации, осуществляемой в прокатных станах в вакууме или на воздухе.

Исходной заготовкой для получения биметалла служит пакет, состоящий из двух различных слоев металла в виде слябов или пластин (рис. 1.13). Обычно применяют одинарные (рис. 1.13, *а*), двойные (рис. 1.13, *б*) или тройные   
(рис. 1.13, *в*) пакеты. Надежное соединение слоев обеспечивается при   
5–7-кратном обжатии, поэтому для получения биметаллического листа толщиной 25 мм исходная толщина пакета должна составлять не менее 250–300 мм.

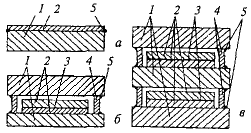


Рис. 1.13. Конструкции пакетов для сварки прокаткой:

*1* – основной слой; *2* – плакирующий слой; *3* – разделительный слой;

*4* – технологическая планка; *5* – сварной шов

Ширина слябов, применяемых для основного слоя при произ­- водстве двухслойных коррозионно-стойких листов из стали, обычно составляет 700–1200 мм, а длина 1700–2500 мм.

Слябы основного слоя из углеродистой и низколегированной стали подвергают правке на прессе и механической обработке по свариваемым поверхностям с последующими обезжириванием, промывкой и сушкой. Одновременно подготавливают пластины плакирующего слоя.

Для уменьшения степени окисления поверхностей заготовок при их нагреве перед сваркой прокаткой пакеты герметизируют сварным швом по периметру, либо сварку прокаткой проводят в защитной атмосфере – в вакууме или инертном газе.

Для нагрева пакетов перед прокаткой используют нагревательные шахтные или камерные печи. Температура нагрева для пакетов из углеродистой и коррозионно-стойкой стали составляет 1200–1250 ºС.

При получении биметаллических листов с покрытием из активных металлов (например, Ti) используют герметичную конструкцию пакета с размещенным внутри пакета пирофорным материалом, например церием, который при нагреве пакета сгорает и связывает кислород окружающей среды. Надежное соединение в процессе горячей прокатки легко окисляющихся металлов достигается при использовании вакуумных прокатных станов.

Пакеты прокатывают на обычных прокатных станах, используемых для получения однослойных листов аналогичных размеров.

Холодную сварку прокаткой применяют для получения двух- или трехслойных биметаллов, состоящих из стальной основы и плакирующих слоев из цветных металлов, например: сталь + латунь, сталь + медь, медь + алюминий, алюминий + титан, алюминий + сталь + алюминий и др. Для получения качественного соединения слоев в биметалле требуется значительная деформация при сварке прокаткой и соответствующей чистоты соединяемых поверхностей,   
а также особенно важно отсутствие органических веществ.

При сварке прокаткой вначале происходит смятие микронеровностей и увеличение контактных поверхностей из-за значительной вытяжки, приводящей к утонению и частичному разрушению оксидных пленок. В отдельных местах контактирования между свариваемыми поверхностями образуются участки схватывания, между которыми остаются полости, содержащие газы. Возможность дальнейшего увеличения числа и площади участков схватывания определяется развитием процесса адсорбции остаточных газов металлом. При дополнительной пластической деформации по мере поглощения газа металлом участки схватывания расширяются, формируются зоны взаимодействия, граница соединения превращается в непрерывную межфазную границу.

Сварка осуществляется в условиях принудительного деформирования и малой длительности взаимодействия. Получение качественного соединения обеспечивается при условиях:

tв ≥ tсв ≥ tр ,

где tв – длительность взаимодействия, определяемая временем силового воздействия, вызывающего пластическую деформацию;

tсв – длительность схватывания контактных поверхностей по всей площади соединения;

tр – длительность релаксации напряжений в зоне контакта до уровня, при котором образующиеся межатомные связи не разрушаются.

Длительность tсв полного схватывания контактных поверхностей определяется временем их активации tа, так как атомы, достигая требуемого энергетического барьера, мгновенно образуют межатомные связи, т. е. tсв = tа. В случае, когда активным центром является дислокация с полем напряжений, длительность активации можно определить по выражению:

tа = L·b/(ξ·S),

где L – путь движения дислокации до барьера;

b – модуль вектора Бюргера;

ξ – скорость пластической деформации металла в зоне сварки;

S – площадь активного центра.

Основные регулируемые параметры сварки прокаткой: Т – температура заготовки перед сваркой; Д – диаметр валков; n – частота их вращения; Δh – величина обжатия. Производными этих параметров являются: длина дуги захвата l, скорость прокатки V, скорость деформации ξ и температура в очаге деформации.

Изменением параметров Д, n, Δh и Т можно в широких пределах изменять значения tв, tсв, tр.

Сварка прокаткой осуществляется на прокатных станах.

## 1.8. Ультразвуковая сварка металлов

УЗК – это упругие деформации, распространяющиеся при возбуждении в какой-либо среде – газовой, жидкой или твёрдой, частота которых превышает частоту слышимых человеком звуков, их нижняя граница условно принята   
16 кГц, верхняя – сотни МГц.

В жидких, газообразных средах могут распространяться лишь продольные волны, т. е. волны, направление распространения которых совпадает с направлением смещения элементарных объёмов. В твёрдых телах, наряду с продольными, появляются поперечные колебания, т. е. колебания, перпендикулярно направленные продольным УЗ-волнам.

Если волна излучается в бесконечность, то она называется бегущей, если же волна распространяется в теле конечной длины, то при условии кратности этой длины длине волны может возникнуть стоячая волна. Такая волна возникает в результате интерференции падающей и отражённой волн. При этом в точках, куда обе волны приходят в одинаковой фазе, их действия складываются, образуя пучность колебаний. В точках, где волны встречаются в противофазе, они компенсируют друг друга, образуя узел смещения.

Ультразвуковая сварка (УЗС) металлов – процесс получения неразъёмных соединений в твёрдой фазе, при которых создание ювинильных (сверхгладких) участков на свариваемых поверхностях и физический контакт между ними обеспечивается специальным инструментом при совместном действии на заготовки нормального сжимающего усилия и знакопеременных тангенциальных относительных смещений малой амплитуды. Эти смещения происходят с ультразвуковой частотой в плоскости «деталь-деталь» и вместе с нормальным усилием вызывают пластическое деформирование микронеровностей приповерхностного слоя металла и эвакуацию из зоны сварки загрязнений.

Типовая колебательная система (рис. 1.14) состоит из электромеханического преобразователя *1*; волноводного звена – трансформатора или иначе концентратора колебательной скорости *2*; акустической развязки системы от корпуса машины *3*; излучателя ультразвука – сварочного наконечника *4* и опоры *5*, на которой располагаются свариваемые детали *6*.

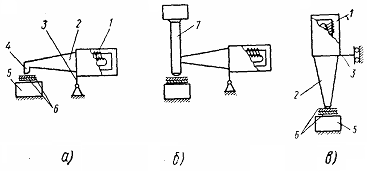


Рис. 1.14. Типовые колебательные системы:

*а* – продольная; *б* – продольно-поперечная; *в* – продольная для сварки пластмасс

Широко известны колебательные системы с использованием резонирующих стержней *7* (рис. 1.14, *б*), работающих в режиме изгибных колебаний.

Прохождение колебаний через металл деталей сопровождается рассеиванием энергии за счёт внешнего трения (плоский источник тепла) и внутреннего трения в объёмах материала, находящегося между ультразвуковым инструментом и опорой, в условиях действия интенсивных УЗК после образования зон схватывания (гистерезисные потери, объёмных потерь тепла).

Это проявляется в повышении температуры в зоне контакта до 0,4–0,7   
от температуры плавления металла.

Повышение температуры, в свою очередь, облегчает протекание пластической деформации, которая ускоряется благодаря снижению предела текучести материала при прохождении через него УЗК. Процесс пластических деформаций локализуется в приповерхностных слоях и сопровождается дроблением   
и механическим выносом окисных плёнок и других загрязнений из зоны контакта.

Основными параметрами процесса являются: амплитуда А (мкм) рабочей части инструмента, сжимающее статическое усилие Р (кгс), время сварки τс и частота УЗК – *f* (кГц).

**Технологические схемы сварки.** Существует целый ряд схем УЗС, отличающихся характером колебаний инструмента (продольные, изгибные, крутильные), способом передачи сжимающего усилия на заготовки, конструкцией опорного элемента.

Для точечной, шовной и контурной сварки металлов используют варианты с продольными и изгибающими колебаниями.

Воздействие УЗК может сочетаться с местным импульсным нагревом заготовок от отдельного источника тепла. При этом достигается возможность снижения амплитуды, усилия и времени пропускания ультразвука.

**Технологические возможности.** Номенклатура материалов, которые могут свариваться УЗС, достаточно обширна. Наиболее хорошо соединяются пластические металлы (серебро, медь, алюминий, никель, золото) как между собой, так и в сочетании с твёрдыми металлами. С увеличением твёрдости, свариваемость этим методом ухудшается. Металлические заготовки могут привариваться к стеклу, перемешиваться, образуя новый материал (кремний, германий).

УЗС могут свариваться тугоплавкие металлы: вольфрам, ниобий, тантал, цирконий, молибден, а также сталь со сталью через прослойку из алюминия.

Хорошо свариваются металлы, покрытые споем искусственного оксида, естественных окислов, лаковыми и полимерными покрытиями.

Основным видом соединения является нахлёсточное, с различным конструированием оформления его элементов. Сварку ведут одной или несколькими точками, непрерывным швом, по замкнутому контуру.

Диапазон свариваемых толщин ограничен толщиной верхней детали.   
С повышением толщины металла необходимы УЗК большой амплитуды, что допустимо до необходимого предела, связанного с появлением усталостных трещин и образованием вмятин. Практически осуществляется сварка плоских элементов толщиной от 3–4 мкм до 0,5–1 мм. Толщина второй детали практически не ограничена.

Технология при ультразвуковой сварке не требует предварительной подготовки свариваемых поверхностей. Для повышения стабильности качества поверхности необходимо лишь обезжиривание растворителем. Определение оптимального соотношения параметров режима сварки на основе теоретических расчётов представляет собой очень трудную многофакторную задачу, поскольку процессы передачи энергии в сварочную зону, определяющие кинетику сварки, протекают в непрерывно меняющихся условиях пластического деформирования, трения соединяемых деталей между собой и инструментом.

Поэтому выбор значений параметров режима осуществляется экспериментально, на основании обработки результатов механических испытаний. Выполняется обычная последовательность подбора Р→τ→А.

Значение параметров УЗС лежит в пределах Р = 0,03–200 кгс, А = 14–25 мм, *f* = 16–22 кГц, σ = 0,1–4 с.

При выборе этих значений для конкретного случая следует принимать во внимание следующее.

При малых значениях Р инструмент проскальзывает по детали – сварка невозможна, предельное увеличение Р приводит к значительной пластической деформации заготовок и делает невозможным соединение в плоскости   
«деталь + деталь». С увеличением толщины верхней детали Р должно возрастать. Пропорционально ей необходимо увеличивать А.

При сварке хрупких металлов необходимо производить сварку на пониженной амплитуде, чтобы предотвратить появление усталостных трещин.

Длительность ультразвукового импульса τ выбирается пропорционально толщине металла, его твердости, а также мощности, подводимой к инструменту.

**Оборудование для УЗС металлов**. В настоящее время имеется весьма большой диапазон универсальных машин. Разработано много машин специального назначения на базе типовых, унифицированных узлов, колебательных систем, приводов давления систем управления, источников питания.

Наибольшее применение УЗС металлов нашла при сборке полупроводниковых металлов, интегральных схем и т. д.

Так, например, машина УЗС А-2 предназначена для сварки выводов проволоки 0,027–0,050 мм.

## 1.9. Магнитно-импульсная сварка

Магнитно-импульсная сварка основана на использовании сил электромеханического взаимодействия между вихревыми токами, наведенными в стенках обрабатываемой детали при пересечении их силовыми магнитными линиями импульсного магнитного поля, и самим магнитным потоком. При этом электрическая энергия непосредственно преобразуется в механическую, и импульс давления магнитного поля действует на заготовку без участия какой-либо передающей среды. Принципиальная схема представлена на рис. 1.15.

Коммутирующее устройство *2* выключается при подаче поджигающего импульса на вспомогательный электрод и вызывает разряд батареи высоковольтных конденсаторов *3* на индуктор *4*.

При разрядке батареи конденсаторов в зазоре между индуктором и заготовкой возникает сильное магнитное поле, индуктирующее в этой заготовке ток. Взаимодействие тока индуктора с индуктированным током в заготовке приводит к возникновению сил отталкивания между индуктором и деталью, вследствие чего деталь *5* с большой скоростью перемещается от индуктора в направлении неподвижной детали *6*. При соударении в зоне контакта развиваются высокие давления, и образуется сварное соединение.

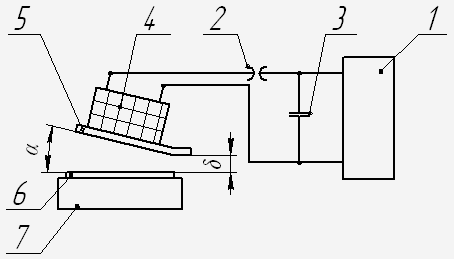


Рис. 1.15. Принципиальная схема магнитно-импульсной сварки:   
*1* – зарядное устройство (высоковольтный трансформатор и выпрямитель);   
*2* – коммутирующее устройство; *3* – батарея высоковольтных конденсаторов;   
*4* – индуктор; *5,* *6* – свариваемые детали; *7* – основание-опора

При магнитно-импульсной сварке давление на метаемый элемент передается мгновенно – со скоростью распространения магнитного поля, и движение сообщается не отдельным участком как при сварке взрывом, а всей метаемой детали. Для обеспечения последовательного перемещения зоны контакта при сварке детали устанавливают под углом друг к другу. Соединение, как и при сварке взрывом, образуется в результате косого соударения свариваемых поверхностей. При этом создаются условия для очистки свариваемых поверхностей от оксидов, загрязнений кумулятивной средой и для интенсивной пластической деформации поверхностей металла с образованием металлических   
связей.

Образование сварного соединения возможно и между параллельно расположенными поверхностями. При этом, вследствие рассеяния магнитного поля, на концах индуктора распределение давления вдоль образующей метаемого элемента неравномерное – меньше к краям и больше в средней части (рис. 1.16).

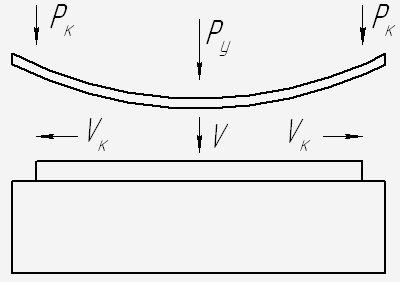
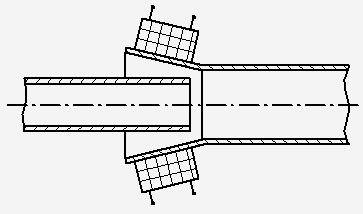


Рис. 1.16. Действующие силы в процессе магнитно-импульсной сварки

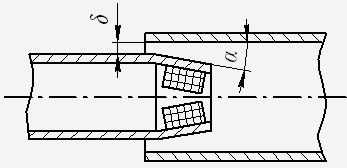
В результате плоское соударение переходит в косое, распространяющееся, в общем случае, в двух противоположных направлениях от зоны начального контакта.

Существуют три основные схемы магнитно-импульсной сварки:

1. Обжатие трубчатых заготовок с использованием индуктора, охватывающего заготовку.



2. Раздача трубчатых заготовок с использованием индуктора, помещенного внутрь заготовки.



3. По схеме рис. 1.15.

Для предотвращения деформации тонкостенных элементов в процессе сварки внутрь трубы вставляют металлическую оправку, удаляемую после сварки.

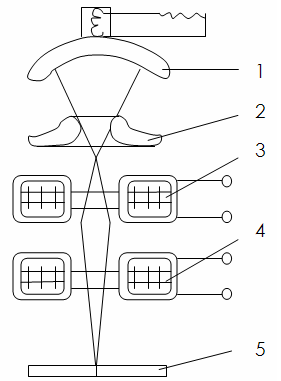
Процесс сварки можно регулировать изменением скорости соударения V, скорости движения фронта контакта Vα и угла соударения поверхностей γ.

# 2. ГРУППА СПЕЦИАЛЬНЫХ МЕТОДОВ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ

## 2.1. Электронно-лучевая сварка

Сущность способа заключается в использовании энергии электронов, движущихся с высокими скоростями в вакууме, для нагрева и расплавления кромок заготовок, подлежащих сварке, так как при бомбардировке электронами поверхности металла подавляющая часть кинетической энергии электронов превращается в теплоту, которая и используется для расплавления металла.   
При этом температура достигает 5000–6000 ºС.

Металл заготовок в месте фокусировки луча расплавляется, образуется сварочная ванна, а после ее кристаллизации формируется сварной шов.   
Электронный луч создается в специальном устройстве, так называемой электронной пушке (рис. 2.1), при этом диаметр пятна электронного луча составляет 0,01–1,2 мм.



*5*

*4*

*3*

*2*

*1*

Рис. 2.1. Схема электронно-лучевой пушки:

*1* – катод с прикатодным электродом; *2* – ускоряющийся электрод (анод);

*3* – фокусирующая магнитная линза; *4* – отклоняющая система; *5* – изделие

К полюсам сварочной установки (аноду и катоду) подводится высокое напряжение (25–120 кВ) постоянного тока силой 35–1000 мА.

Сварка электронным лучем возможна только в случае, если в сварочной камере имеется вакуум 10–4 мм рт. ст. (133·10–4 Н/м2).

При падении вакуума ниже указанного значения могут возникнуть дуговые разряды с корпусом пушки, электронный луч расфокусируется, что исключает возможность сварки.

Скорость сварки определяется скоростью перемещения заготовки в камере под неподвижным пятном луча или отклонением луча с помощью отклоняющих систем. Наблюдение за процессом сварки осуществляется через иллюминаторы или с помощью телевизионных систем.

Все процессы сварки, включая загрузку и выгрузку, особенно крупногабаритных деталей – механизированы и автоматизированы. Основным элементом сварочных установок является пушка (рис. 2.1), служащая для генерации свободных электронов, формирования их в пучок и значительного ускорения.

Пушки бывают длиннофокусные, в которых электроны разгоняются на участке между катодом и анодом с фокусным расстоянием 300–500 мм. В этом случае изделие не является элементом электрической цепи, т. е. возможна обработка неэлектропроводных материалов.

В короткофокусных (с расстоянием 30–40 мм) пушках анодом является само изделие. Эти пушки имеют меньшие размеры, помещаются внутри камеры (вакуумной). В них свариваются электропроводные материалы.

Отечественная промышленность выпускает ЭЛУ средней мощности типа А 306-05 с ускоряющим напряжением до 25 кВ и силой тока луча до 120 мА.

**Области применения.** Способ можно применять для сварки практически всех материалов, в том числе и разнородных (например, Ме с керамикой).

Использование высококонцентрированного источника энергии для сварки позволяет достигать малую зону термического влияния, что значительно уменьшает возможность деформации сварных конструкций, особенно крупногабаритных. Высокая концентрация тепловой энергии позволяет сваривать заготовки толщиной до 200 мм за один проход, при этом обеспечивается достаточно высокая производительность (до 100 м/ч) и малая ширина шва от 1 до 5 мм и, соответственно, малая зона термического влияния.

С помощью электронного луча можно прошивать отверстия малого диаметра (диаметром, меньше человеческого волоса), прорезать узкие пазы, разрезать на части заготовки, особенно из драгоценных металлов, а также неметаллов. Края реза получаются ровные и чистые, а структура смежных слоев остается неизменной.

## 2.2. Сварка лазерным лучом

Сущность процесса заключается в том, что для сварки и других видов   
обработки применяют световые лучи с высокой плотностью энергии   
(øпятна = 0,25–0,05 мм), которые излучаются с помощью оптических квантовых генераторов (рис. 2.2). В основу принципа работы оптического квантового генератора и усилителя положено индуцированное излучение, которое связано с поглощением электромагнитных волн или фотонов атомными системами.   
При поглощении фотона его энергия передается атому, который переходит в возбужденное квантовое состояние. Через некоторый промежуток времени атом может спонтанно излучать эту энергию в виде фотона и возвращаться в исходное состояние. Пока атом находится в возбужденном состоянии, его можно побудить испустить фотон под воздействием внешнего фотона – падающей волны, энергия которого в точности равна энергии фотона, испускаемого при спонтанном излучении. Такое излучение называется индуцированным. В результате падающая волна усиливается волной, излучаемой возбужденным атомом. Важным в этом процессе является то, что испускаемая волна в точности совпадает по фазе с той, под действием которой она возникла. Это явление используется в квантовых генераторах. Они преобразуют электрическую, световую, тепловую, химическую энергию в монохроматическое когерентное излучение электромагнитных волн ультрафиолетового видимого и инфракрасного диапазона.

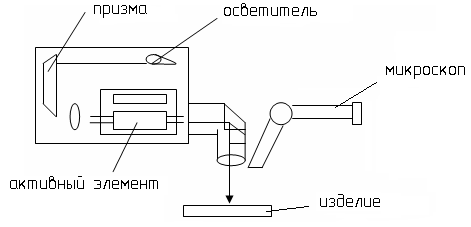


Рис. 2.2. Оптический квантовый генератор

Плотность энергии в фокусе может достигать 5·103кг/мм2 при диаметре пятна 0,01–0,05 мм.

Рубин – искусственный минерал – окись Al, в котором небольшое число атомов Al замещено атомами хрома. В бледно-розовом рубине 0,05%Cr.

Рубиновый стерженек помещают вблизи электронной лампы-вспышки или специальной индукционной катушки, являющейся источником широкополосного света для оптической накачки.

Квантовые генераторы преобразуют электрическую, световую, тепловую или химическую энергию в монохроматическое, когерентное (согласованное во времени, т. е. между фазами имеется неизменное соотношение) излучение.

Излучателями могут быть твердые тела (рубин, гранат с эрбием), жидкости (например, раствор окиси ниодима), газы (водород, азот, углекислый газ).

Работает лазер в импульсном и непрерывном режимах.

Для осуществления сварки необходимо, чтобы импульсы имели максимальную длительность при минимальных интервалах. КПД лазера на бледно-розовом рубине составляет до 0,2 %.

Существующие сварочные лазеры позволяют получать частоту повторения импульсов от 1 до 100 в мин.

Сварка лазером выгодно отличается от ЭЛС, так как выполняется в любой среде и на открытом воздухе.

**Область применения**. Высокая плотность энергии лазерного луча позволяет нагревать практически все металлы до кипения.

На практике мощность импульсов при сварке нужно ограничивать, так как испарение металла шва из сварочной ванны может снизить качество сварного соединения. В настоящее время накоплен достаточный практический опыт по сварке тонколистовых материалов (см. табл. 2.1).

Таблица 2.1

Параметры режимов сварки стыковых соединений лазером на СО2

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Металл | Толщина,  мм | Ширина шва,  мм | Скорость,  мм/с | Мощность,  Вт |
| Нерж. сталь | 0,125 | 0,45 | 50 | 250 |
| 0,25 | 0,7 | 37 | 250 |
| Никель | 0,125 | 0,45 | 15 | 250 |
| Титан | 0,125 | 0,37 | 35 | 250 |
| 0,45 | – | 15 | 500 |

На мощных установках на СО2 можно сваривать стальные заготовки толщиной до 10–15 мм.

Однако лазером можно сваривать и очень тонкие элементы (спирали, полукольца, диаметром несколько десятков микрометра).

Широкое применение лазерная сварка находит в радиоэлектронике, например, при сварке контактов проводников на микроплатах.

Можно сваривать различные композиции металлов – золото + кремний, серебро + латунь, медь + алюминий и т. д.

Лазером можно производить резку, прошивку отверстий в любых материалах толщиной от 0,5 до 10 мм методом прямого испарения. Место реза высокого качества по чистоте и точности и может выполняться в любых пространственных положениях.

## 2.3. Плазменная и микроплазменная сварка

Плазменная сварка относится к дуговым способам, при этом в качестве источника нагрева используется сжатая дуга (предложена в 50-х годах XX в.).

Плазма – частично или полностью ионизированный газ, состоящий из нейтральных атомов и молекул, ионов и электродов. Типичное плазменное состояние вещества имеет место в электрическом газовом разряде.

Плазменные струи получают в плазменных горелках, которые называют плазмотронами.

В промышленности находят применение, главным образом, дуговые плазменные горелки постоянного тока.

В инженерной практике используются две основные принципиальные схемы дуговых плазменных горелок – прямого и косвенного действия (рис. 2.3).

Плазма газового разряда в зависимости от состава среды характеризуется температурами от 2000–3000 °С до 40000–50000 °С. В дугах средней мощности (сила тока до 1000 А) плазма обычно имеет температуру 5000–20000 °С.

Наиболее распространены способы получения плазменных струй путем интенсивного охлаждения газовым потоком столба дуги, горящей в сравнительно узком водоохлаждаемом канале плазменной горелки.

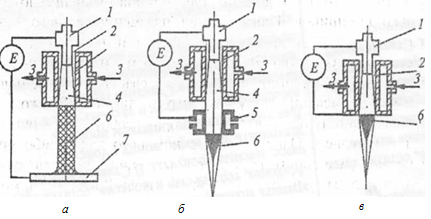
**

Рис. 2.3. Принципиальные схемы дуговых плазменных горелок (плазмотронов) для получения:   
а – плазменной дуги; б, в – плазменной струи;

1 – электрод; 2 – канал; 3 – охлаждающая вода; 4 – столб дуги; *5* – сопло;

6 – плазменная струя; *7* – объект нагрева; Е – источник тока

**Горелки прямого действия для сварки плазменной дугой.** В них одним из электродов служит обрабатываемый материал (рис. 2.3, *а*). В этом случае используют два энергетических источника: плазменную струю и электрически активное пятно дуги. Внутренний КПД такой горелки, т. е. коэффициент использования подведенной к ней электроэнергии, достигает 60–80 %.

**Горелки косвенного действия для сварки плазменной струей** (рис. 2.3, *б*, *в*)**.** Для снижения тепловой нагрузки на электроды применяют плазменные горелки с магнитным закручиванием дуги. Максимальные значения внутреннего КПД таких горелок (при больших расходах газа) достигают 50–70 %. Часть энергии дуги расходуется на нагрев электродов разряда, а также рассеивается в окружающее пространство, вследствие лучистого и конвективного теплообмена.

Состав плазмообразующего газа (аргон, гелий, азот и пр.) выбирают в зависимости от требований, предъявляемых к процессу. Электроды изготавливают обычно из меди и вольфрама. Стенки камеры защищены от теплового воздействия дуги слоем сравнительно холодного газа.

Ярко светящееся ядро плазменной струи с основанием, несколько меньшим размера выходного отверстия сопла, окружено менее светящимся факелом. Длина струи определяется мощностью дуги, размерами сопла, видом газа и его расходом. При ламинарном истечении газа (для низких скоростей струи) наблюдается длинная, малосмешивающаяся с окружающей атмосферой, струя плазмы. Короткая струя плазмы наблюдается при турбулентном истечении газа (для больших скоростей струи). Формой сопла можно задавать очертание плазменной струи и тем самым распределение теплового и силового воздействия по поверхности обрабатываемого тела.

Температура плазменной струи по радиусу *r* и длине *l* распределяется крайне неравномерно. Максимальная температура наблюдается в центре струи. В токоведущей части плазменной струи вблизи катода температура газа достигает 24000–32000 °С.

В инженерной практике плазменную струю обычно характеризуют среднемассовой температурой на срезе сопла плазменной горелки, которая может быть определена по удельной энтальпии плазмообразующего газа:

Н = д / О,

где д – эффективная мощность плазменной струи на срезе сопла, Дж/с;

О – массовый расход плазмообразующего газа, г/с.

В табл. 2.2 показаны основные параметры, часто используемые в процессах плазменной обработки.

Таблица 2.2

Технологические параметры плазменной сварки

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Плазмообразующий газ | Мощность дуги, кВт | Расход газа, г/с | КПД, % | Н, МДж/м3 | Среднемассовая температура плазмы, ºС |
| Азот | 25 | 0,5 | 60 | 37,681 | 7080 |
| Водород | 25 | 0,1 | 80 | 18,066 | 3800 |
| Воздух | 25 | 0,5 | 50 | 32,490 | 6550 |
| Аргон | 25 | 0,5 | 40 | 35,775 | 13830 |

Основными параметрами регулирования тепловых характеристик плазм струи являются: сила тока, длина дуги, расход плазмообразующего газа. Увеличение силы тока и длины дуги приводит к возрастанию температуры струи. Повышение расхода плазмообразующего газа при бывших его значениях снижает среднемассовую температуру струи, вследствие конвективных потерь при турбулентном характере истечения струи из сопла.

Увеличение расхода газа при малых его значениях приводит к резкому увеличению мощности струи.

Преимущества лазерной сварки состоят в следующем:

1. По сравнению с аргоно-дуговой плазменная сварка характеризуется более стабильным горением дуги и обеспечивается более равномерное проплавление кромок.

2. По проплавляющей способности она занимает промежуточное положение между ЭЛС и аргоно-дуговой сваркой.

3. Плазменно-дуговая сварка менее чувствительна к изменению длины дуги, чем аргоно-дуговая сварка, благодаря цилиндрической форме столба   
дуги.

Одним из существенных недостатков плазменной сварки является возможность образования двойной дуги, возникающей при повышении плотности сварочного тока, образующаяся между соплом и изделием, в результате чего оплавляется сопло и уменьшается ток основной дуги.

Широкое распространение получает сварка проникающей плазменной дугой («в замочную скважину»), когда вольфрамовый электрод заглублен внутрь сопла. При этом плазменная дуга приобретает столбообразную форму. Сосредоточенный столб дуги создает отверстие перед фронтом сварочной ванны, проплавляя стыковое соединение на всю глубину детали. При движении плазменной горелки вперед расплавленный металл под действием поверхностного натяжения заполняет проплавленное отверстие, формируя аккуратный сварной шов с отношением глубины к ширине 1:1. «Замочная скважина» позволяет сваривать стыки толщиной до 8 мм без предварительной разделки и подачи присадочного материала. При толщине до 12 мм делают фаски 4–5 мм и под углом 60° сваривают с подачей присадочного материала.

Отдельно следует выделить сварку микроплазменной дугой.

Микроплазменной дугой (сила тока 0,1–15 А) сваривают листы толщиной 0,025–0,8 мм из углеродистой и нержавеющей стали, меди, титана, тантала, молибдена, вольфрама, золота и др.

Источники питания позволяют вести процесс в непрерывном и импульсном режимах.

По сравнению с аргоно-дуговой микроплазменная сварка имеет следующие преимущества:

1) изменение длины микроплазменной дуги оказывает значительно меньшее влияние на качество сварного соединения деталей малых толщин;

2) дежурная плазменная дуга уверенно зажигается при токах менее 1 А;

3) облегчается доступ к объекту сварки и улучшается зрительный обзор рабочего пространства (на токе – 15 А длина дуги достигает 10 мм).

Наиболее часто при микроплазменной сварке встречаются соединения по отбортовке.

Микроплазменная сварка находит широкое применение в радиоэлектронике и приборостроении для сварки тонких листов и фольги. В авиационной промышленности с помощью микроплазменной сварки изготавливают детали толщиной 0,1–0,5 мм типа сильфонов, тонкостенных трубопроводов, деталей приборов из легированных сталей, алюминиевых сплавов, тугоплавких металлов. В последнее время микроплазменная сварка широко применяется в производстве и ремонте деталей электроники и космонавтики, измерительных инструментов, ювелирных изделий, металлических фильтров и др.

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шестель, Л. А. Специальные методы сварки и пайка: конспект лекций / Л. А. Шестель. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. – 68 с.

2. Виль В.И. Сварка металлов трением / В.И. Виль. – Л.: Машиностроение, 1970. – 175 с.

3. Волков С.С. Особенности конструирования изделий из пластмасс, изготовляемых с применением ультразвуковой сварки / С.С. Волков // Сварочное производство. – 1999. – № 5. – С. 26–29.

4. Гельман А.С. Основы сварки давлением / А.С. Гельман. – М.: Машиностроение, 1970. – 312 с.

5. Дудин А.А. Магнитно-импульсная сварка металлов / А.А. Дудин. – М.: Машиностроение, 1979. – 128 с.

6. Кабанов Н.С. Сварка на контактных машинах / Н.С. Кабанов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк.,1973. – 255 с.

7. Казаков Н.Ф. Диффузионная сварка металлов / Н.Ф. Казаков. – М.: Машиностроение, 1976. – 312 с.

8. Каракозов Э.С. Соединение металлов в твердой фазе / Э.С. Каракозов. – М.: Металлургия, 1976. – 263 с.

9. Каракозов Э.С. Сварка металлов давлением / Э.С. Каракозов. – М.: Машиностроение, 1986. – 276 с.

10. Квасницкий В.Ф. Сварка и пайка жаропрочных сплавов в судостроении / В.Ф. Квасницкий. – Л.: Судостроение, 1986. – 224 с.

11. Конон Ю.А. Сварка взрывом / Ю.А. Конон, Л.Б. Первухин, А.Д. Чудновский. – М.: Машиностроение, 1987. – 216 с.

12. 14. Нефёдов Б.Б. Развитие плазменной сварки-наплавки за рубежом /   
Б.Б. Нефёдов, В.П. Лялякин // Сварочное производство. – 1998. – № 3. –   
С. 21–27.

13. Никитинский А.М. К вопросу о смачивании и поверхностном натяжении / А.М. Никитинский // Сварочное производство. – 1999. – № 1. – С. 7–11.

14. Николаев Г.А. Специальные методы сварки / Г.А. Николаев,   
Н.А. Ольшанский. – М.: Машиностроение, 1975. – 231 с.

15. Петрухин И.Е. Физико-химические процессы при сварке / И.Е. Петрухин. – М.: Высш. шк., 1972. – 280 с.

16. Сахацкий Г.П. Технология сварки металлов в холодном состоянии / Г.П. Сахацкий. – Киев: Наукова думка, 1979. – 295 с.

17. Сварка в машиностроении: справочник. В 4 т. Т. 1 / под ред.   
Н.А. Ольшанского. – М.: Машиностроение, 1978. – 504 с.

18. Сварка в машиностроении: справочник. В 4 т. Т. 2 / под ред.   
А.И. Акулова. – М.: Машиностроение, 1978. – 462 с.

19. Сварка трением: справочник / под ред. В.К. Лебедева, И.А. Черненко, В.И. Вилль. – Л.: Машиностроение, 1987. – 236 с.

20. Специальные методы сварки и пайки: учебник для ср.-спец. учеб. зав. / В.В. Пешков [и др.]; под ред. В.А.Фролова. – М.: Интермет Инжиниринг, 2003. – 184 с.

21. Холопов Ю.В. Ультразвуковая сварка / Ю.В. Холопов. – Л.: Машиностроение, 1972. – 152 с.

28. Шамов А.Н. Высокочастотная сварка металлов / А.Н. Шамов,   
И.В. Лунин, В.Н. Иванов. – Л.: Машиностроение, 1977. – 198 с.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

[ВВЕДЕНИЕ 3](#_Toc334425581)

[1. ГРУППА МЕТОДОВ СВАРКИ В ТВЕРДОЙ ФАЗЕ 4](#_Toc334425582)

[1.1. Физические основы сварки 4](#_Toc334425583)

[1.2. Холодная сварка 7](#_Toc334425584)

[1.3. Сварка трением 12](#_Toc334425585)

[1.4. Сварка взрывом 18](#_Toc334425586)

[1.5. Высокочастотная сварка 23](#_Toc334425587)

[1.6. Диффузионная сварка в вакууме 25](#_Toc334425588)

[1.7. Сварка прокаткой 27](#_Toc334425589)

[1.8. Ультразвуковая сварка металлов 29](#_Toc334425590)

[1.9. Магнитно-импульсная сварка 32](#_Toc334425591)

[2. ГРУППА СПЕЦИАЛЬНЫХ МЕТОДОВ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ 35](#_Toc334425592)

[2.1. Электронно-лучевая сварка 35](#_Toc334425593)

[2.2. Сварка лазерным лучом 37](#_Toc334425594)

[2.3. Плазменная и микроплазменная сварка 39](#_Toc334425595)

[БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 43](#_Toc334425596)

[ОГЛАВЛЕНИЕ 45](#_Toc334425597)