

12 СВАРКА

12.1 Общие сведения

Сваркой называется технологический процесс получения механический неразъемных соединений различных материалов.

Сущность сварки заключается в сближении элементарных частиц свариваемых частей настолько, чтобы между ними начали действовать межатомные связи, которые обеспечивают прочные соединения.

Взаимодействие наступает при сближении их на расстояния, примерно равные атомному радиусу. Поверхность металлов имеет неровности, она покрыта загрязнениями, состоящими из оксидов, адсорбированных газов и органических пленок (масел). Чтобы обеспечить процесс сварки, необходимо активизировать поверхностные атомы металла, выровнять поверхность или осуществлять плотный контакт и удалив из зоны сварки оксиды или органические пленки. Поэтому возникновение межатомного или межмолекулярного взаимодействия происходит при затратах механической или тепловой энергии. Сваркой соединяют металлы, сплавы и неметаллические материалы, а в случае необходимости производят их наплавку на изделия и детали. Сваркой получают прочные соединения элементов металлических конструкций любой формы толщиной от 0,1 до 250 мм и более. Сварные конструкции на 30-40% легче литых.

В сварочном производстве методы сварки по способу соединения поверхностей заготовок делятся на три класса: термический, механический, термомеханический.

При *термическом* методе сварки происходит расплавление кромок свариваемых заготовок. Кэтим методам относятся:

- электродуговая;
- электрошлаковая;
- плазменная;
- электронно-лучевая;
- лазерная;
- газовая и др.

При *механических* методах сварки соединение заготовок происходит путем совместной пластической деформацией соединяемых поверхностей за счет приложения внешнего усилия. Кэтим методам относятся:

- холодная сварка;
- сварка взрывом;
- ультразвуковая сварка;
- сварка трением и др.

При *термомеханических* методах сварки одновременно приложением внешнего давления, материал в зоне соединения нагревают для снижения сопротивления деформации и в целях повышения его пластичности. Кэтим методам относятся:

- контактная;
- газопрессовая;
- диффузионная;
- кузнечная и др.

Термический класс сварки называют также сваркой плавлением, а термомеханический и механический – сваркой давлением.

По степени автоматизации различают ручную, полуавтоматическую и автоматическую сварку.

По виду применяемой энергии сварка может быть электрической (все виды дуговой сварки, электрошлаковая и др.), химической (газовая, термитная и др.) и механической (трением, давлением и др.).

12.2 Сварка плавлением

12.2.1 Электродуговая сварка

Процесс соединения металлических элементов, при котором в качестве сварочного источника теплоты используют электрическую дугу, называют дуговой сваркой. Под действием тепда дуги металл кромок свариваемых частей расплавляется, образуя общий объем жидкого металла, сварочную ванну. При перемещении дуги вдоль кромок деталей сварочная ванна затвердевает и образуется сварной шов, соединяющий свариваемые изделия.

Явление электрического разряда и возможность его использования для расплавления металлов было открыто и использовано в 1802 году. Установлено, что электрическая дуга представляет одну из разновидностей электрического тока, проходящего через газовый промежуток.

Сварочная дуга представляет собой мощный электрический разряд в сильно ионизированной среде, сопровождающийся большим выделением теплоты и света.

Сущностью использования дуги для сварки металлов заключается в следующем. Дуга 1 (рис.3,а) возбуждается и горит между угольным электродом 2 и изделием 3. Угольный электрод установлен в держателе 4. Дуга питается током от генератора 5. Теплотой дуги расплавляются кромки свариваемого изделия и присадочный пруток 7. Образующийся при этом жидкий металл сварочной ванны 6 перемешивается с присадочным. При остывании и кристаллизации жидкого металла образуется сварной шов.

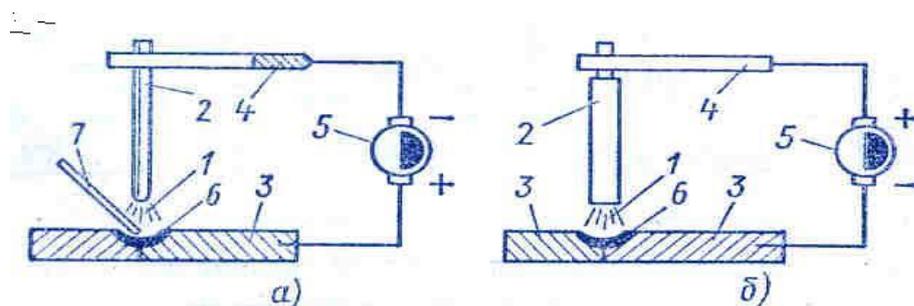


Рис. 12.1 -Схема ручного процесса дуговой сварки

При прямой полярности (катод-электрод; анод-изделие): при обратной полярности (катод-изделие, анод- электрод).

Сварку можно производить на постоянным и переменным токами. Для питания постоянным током применяют электросварочные генераторы постоянного тока. При сварке переменным током используют сварочные трансформаторы, они понижают напряжение заводской сети от 220 или 380 до 55 или 65 В.

При нормальных условиях в промежутке электрод-изделие отсутствует пары материалов, а газы не проводят электрический ток. Это возможно, когда в них появляются заряженные частицы – ионы и электроны. Поэтому дуговой промежуток, в котором происходит дуговой разряд, должен быть ионизирован.

Зажигание дуги производится мгновенным соприкосновением электрода с изделием. В момент короткого замыкания сварочной цепи происходит быстрый разогрев места контакта электрода с изделием. Нагрев конца электрода и металла изделия при протекании тока короткого замыкания сопровождается образованием легко ионизирующих паров металла и компонентов покрытия. Они заполняют дуговой промежуток в момент отрыва электрода от изделия.

Движущиеся под действием электрического поля электроды взаимодействуют с нейтральными молекулами паров и газов, в результате чего образуются положительные и отрицательные ионы и электроны. При этом дуговой промежуток из диэлектрика превращается в проводник.

Электродугой свариваются почти все конструкционные стали, медь, алюминий, титан, никель и их сплавы, серый и ковкий чугуны.

Для обеспечения устойчивого горения сварочной дуги необходимо, чтобы ее основные параметры (ток и напряжение) находились в определенной зависимости друг от друга.

Графическое изображение этой зависимости называется вольт – амперной характеристикой дуги (рис.12.2).

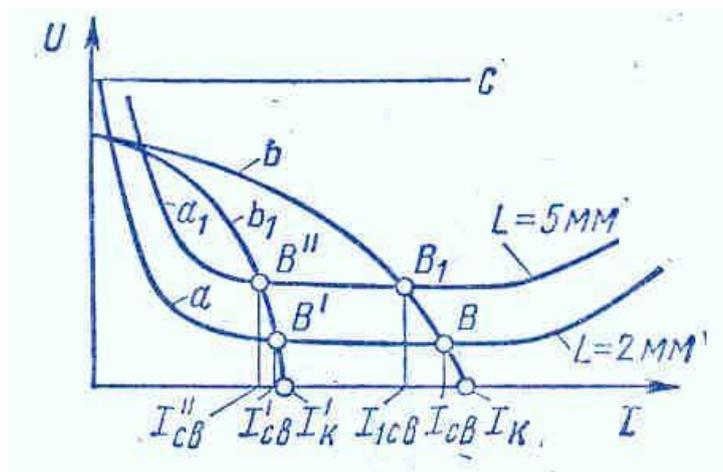


Рис.12.2- Внешняя вольт – амперная характеристика дуги.

12.2.2 Ручная дуговая сварка

Ручную дуговую сварку выполняют сварочными электродами, которую вручную перемещают вдоль свариваемых заготовок. При ведении ручной дуговой сварки применяют электродержатель, щиток и шлем для защиты глаз и лица сварщика от действия лучей электрической дуги и брызг.

Ручная дуговая сварка применяется для сварки коротких и прерывистых швов, а также швов сложной конфигурации, т.е. в тех случаях, когда невозможно или невыгодно применять автоматическую сварку.

Сварочный электрод представляет собой металлический стержень с нанесенным на его поверхность слоем специального покрытия. Металлические стержни электродов изготовляют из сварочной проволоки диаметром от 0,3 до 12мм и длиной от 250 до 450мм.

Угольные и вольфрамовые неплавящиеся электроды применяют для сварки цветных металлов, наплавки твердых сплавов, сварки деталей малой толщины на постоянном токе. При этом обычно применяется присадочный материал в виде металлического стержня, подаваемого в дугу.

Для ручной сварки стальных изделий или заготовок применяют обмазанные электроды, которые разделены на ряд типов. ГОСТом 9467-75 предусмотрены электроды марок с Э38, Э42, Э46 и др. по Э150 (всего 15 типов).

Покрытие может быть тонким (ионизирующим) и толстым (защитно-легирующим). Кроме типа важной характеристикой является состав покрытия электрода, которое помимо создания устойчивости дуги, защищают расплавленный металл от окисления и насыщения азотом воздуха, а также легируют шов различными элементами, обеспечивающими прочность сварного соединения.

Свойства электрода определяются в основном химическим составом электродного стержня и покрытия. Химический состав электродной стальной проволоки, из которой изготовляют электродные стержни, выбирают в соответствии с химическим составом и свойствами металла свариваемого изделия.

Обозначение марок электродной проволоки Св-08 или Св-30ХГСА. Первые две буквы Св указывают на назначение проволоки – сварочная для изготовления электродов, а следующие за буквами цифры и буквы с цифрами аналогичны обозначениям, принятым для углеродистых качественных машиностроительных сталей.

Преимуществом ручной дуговой сварки является возможность выполнения швов в любом положении – нижнем, вертикальном, горизонтальном, потолочном и в труднодоступных местах. Для увеличения производительности ручной дуговой сварки применяют сварку пучком электродов и сварку трехфазной дугой, которая по сравнению с однофазной сваркой дает увеличение производительности труда в 2-3 раза и экономию электроэнергии до 25 %.

12.2.3 Автоматическая дуговая сварка

Применение автоматической и полуавтоматической дуговой сварки обеспечивает стабильное качество сварного шва и высокую производительность процесса (5-10 раз выше ручной).

При автоматической дуговой сварке механизмируются управление дугой и подача сварочного материала. Ее целесообразно применять в массовом или крупносерийном производстве однородных деталей. При полуавтоматической сварке подача электродной проволоки осуществляется сварщиком вручную вдоль выполняемого шва.

Сущность этого метода сварки состоит в том, что электрическая дуга, возникающая между голой электродной проволокой и свариваемым металлом, горит под слоем гранулированного флюса. Флюс представляет собой зернообразный продукт с размерами зерен 1-3мм. Флюс защищает расплавленный металл от насыщения азотом и кислородом воздуха. В результате применения флюса получается однородный сварной шов высокого качества. Сварка производится со скоростью 6-32 м/ч. Источником питания служит электросварочный генератор или трансформатор.

12.2.4 Электродуговая сварка в среде защитных газов

Особенность этого вида сварки в том, что электрическая сварочная дуга горит в струе газа, защищающей металл от вредного воздействия окружающего воздуха. В качестве защитных применяют инертные и активные газы (водород, окись углерода или их смесь с азотом). Наибольшее распространение получили аргонодуговая сварка и сварка в среде углекислого газа.

12.2.5 Аргонодуговая сварка

При аргонодуговой сварке в качестве защитного газа, используется аргон. Аргон- инертный газ, хранят и транспортируют в специальных баллонах под давлением 15 МПа. Применяют аргонодуговую сварку неплавящимся вольфрамовым и плавящимся электродом. Этот процесс предназначен главным образом для металлов толщиной менее 3-4 мм.

При аргонодуговой сварке в специальную сварочную горелку подается аргон, струя которого непрерывно истекает из сопла горелки, оттесняя воздух и защищая электрод, дугу и сварочную ванну от взаимодействия с азотом и кислородом воздуха. Благодаря этому становится возможной сварка практически всех металлов и сплавов, в том числе химически активных и тугоплавких металлов.

12.2.6 Сварка в среде углекислого газа

Производится аналогично аргонодуговой, но в зону сварки подается углекислый газ. Она выполняется только плавящимся электродом на постоянном токе обратной полярности.

Этот способ характеризуется высокой производительностью, а также низкой стоимостью по сравнению с аргонодуговой сваркой и находит все

большее применение для сварки низкоуглеродистых, низколегированных и некоторых высоколегированных сталей.

Углекислый газ поставляют в сжиженном состоянии в стальных баллонах под давлением 7,5 МПа.

12.3 Другие виды сварки плавлением

12.3.1 Газовая сварка

При газовой сварке для местного расплавления свариваемых металлических частей и дополнительно вводимого присадочного материала используется тепло, образующееся при сгорании горючих газов в кислороде с температурой пламени 3100-3300⁰С.

Для образования сварочного пламени при газовой сварке используют различные горючие газы или пары горючих жидкостей: ацетилен, пропан, бутан, природный газ, водород, пары бензина, керосина и др. Однако наиболее широко применяют ацетилен C_2H_2 , дающий наиболее высокую температуру пламени (3200⁰С) и большое количество теплоты. Кислород O_2 добывается для промышленных целей на кислородных станциях из воздуха или электролизом воды.

Кислород хранят и транспортируют в газообразном виде в специальных стальных баллонах под давлением 15 МПа. Ацетиленовые баллоны заполняются ацетиленом до давления 1,5-1,6 МПа. Кислородные баллоны окрашиваются в голубой цвет, а ацетиленовые – в белый цвет. В ряде случаев пользуются переносными ацетиленовыми генераторами, например типа АСВ-1,25, в которых ацетилен получают на месте сварки из карбида кальция и воды. Для образования газосварочного пламени служат газосварочные горелки (рис.3).

Горелка работает следующим образом. Кислород через регулирующий вентиль 6 и трубку 7 подается к инжектору 5. Из узкого канала инжектора кислород выходит с большой скоростью и создает разрежение в камере 4, благодаря чему засасывается ацетилен, поступающий через вентиль 9 и канал 8. В камере смещения 3 образуется горючая смесь, которая поступает по наконечнику 2 к мундштуку 1, на выходе из которого образуется сварочное пламя.

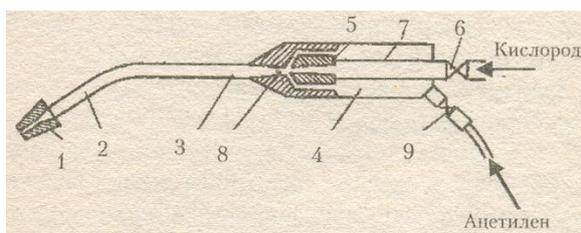


Рис.12.4- Схема газосварочной горелки.

Газовую сварку чугуна применяют при заварке раковин, трещин в отливках ответственного назначения и при ремонтных работах. Газовой сваркой выполняют такие же виды сварных соединений, как и электродуговой сваркой.

12.3.2 Плазменная сварка и резка металлов

При плазменной сварке основным источником нагрева и расплавления металлов является плазма, т.е. смесь электрически нейтральных молекул газа и электрически заряженных частиц – электронов и положительных ионов. Плазму получают в специальных плазменных горелках при пропускании газа через сжатую электрическую дугу. Дуга горит в сопле горелки, через сопло проходит газ. Проходя через дугу, газ сжимается, нагревается, ионизируется и выходит из сопла в виде высокотемпературной газовой струи. Обжатие дуги газом приводит к повышению ее температуры в 3-5 раз. Кроме плазмообразующего газа (гелия, углекислого газа и др.) через горелку подается защитный газ (аргон), который обеспечивает изоляцию зоны сварки от контакта с воздухом. Плазменной струей можно проводить сварку, резку, пайку, напыление, термообработку, обрабатывать неметаллические материалы (керамика, стекло). Температура плазмы может достигать 20000 – 30000⁰С.

12.3.3 Электронно-лучевая сварка

Нагрев металла при этом способе осуществляется потоком лучей быстро движущихся электронов, ускоряемых электрическим полем. Падая на поверхность изделия, электроны отдают свою кинетическую энергию, превращающуюся в тепловую, и нагревают металл до температуры 5000 - 6000⁰С, что достаточно для плавления металлов при сварке и для их тепловой обработки. Процесс обычно ведется в герметически закрытой камере с высоким вакуумом, необходимым для свободного движения электронов и обеспечения чистоты наплавленного металла.

Генератор электронного луча называют электронной пушкой. Электронным лучом можно сваривать заготовки толщиной от 0,01 до 100 мм и более, а также тугоплавкие и разнородные металлы. Полученный шов отличается высокой прочностью, плотностью и чистотой. Основная область применения электронно-лучевой сварки – радиоэлектроника и приборостроение.

12.3.4 Лазерная сварка

В качестве источника тепла при сварке лазером используется мощный, концентрированный световой луч, получаемой в специальной установке (лазере), являющейся тепловым источником с высокой плотностью энергии – до 10⁷ -10¹⁰ Вт/см². При этом размеры пятна лазерного луча составляет десятые доли миллиметра, что позволяет получать соединения с минимальным расплавлением металла, что снижает напряжения и деформации в сварных конструкциях.

Преимущества сварки световым лучом по сравнению со сваркой электронным лучом следующие: простота фокусировки луча, возможность сварки на воздухе, в защитной атмосфере и в вакууме без каких-либо качественных изменений исходного состояния свариваемого металла. Возможность точной дозировки энергии позволяет использовать этот метод для сварки микросоединений из различных металлов и сплавов в электронной и радиоэлектронной технике. Этот перспективный способ сварки находит применение и в других отраслях народного хозяйства, например в медицине для соединения живых тканей.

12.3.5 Электрошлаковая сварка

При этом способе (рис.4) между установленными вертикально свариваемыми частями 1 создается большой зазор (30-50 мм), в который засыпается слой специального флюса толщиной 50-70 мм. При пропускании через флюс электрического тока от специального трансформатора 3 флюс расплавляется и образует между свариваемыми частями 1 шлаковую ванну 4, обладающую большим электрическим сопротивлением, вследствие чего ток, проходя через расплавленный флюс выделяет большое количество теплоты.

Сущность- расплавленный флюс образует шлаковую ванну, которая является проводником электрического тока. Расплавленный флюс шлаковой ванны нагревается до температуры 2000°C , т.е. выше температуры плавления основного металла, соприкасаясь с боковыми поверхностями свариваемых частей 1, оплавляет их и одновременно расплавляет присаживаемую в шлаковую ванну электродную проволоку 2. Под шлаковой ванной создается металлическая ванна 5, которая по мере остывания металла отвердевает, образуя прочный сварной шов 6, соединяющий свариваемые части.

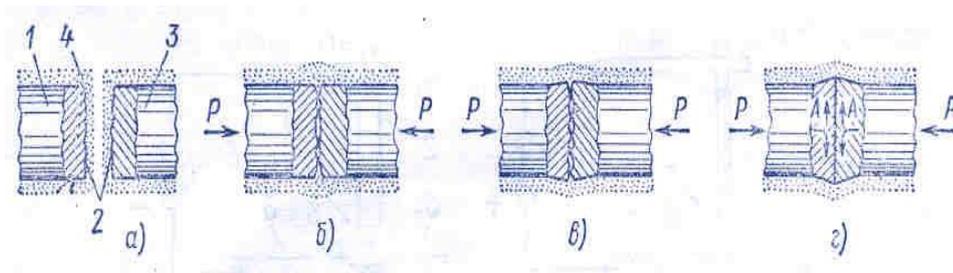
Сварка выполняется за один проход, что позволяет во много раз повышать производительность при изготовлении конструкции из толстого металла (стыки, толщиной 150-450 мм). Обеспечивается высокое качество сварного соединения благодаря защите расплавленного металла жидким шлаком. Широко применяется в тяжелом машиностроении для изготовления сварнолитых, сварнокованных и сварнопрокатных конструкций.

12.4 Основные виды сварки давлением

Для сварки давлением характерны две стадии:

- сближение соединяемых поверхностей заготовок до образования физического контакта;
- появление на контактной поверхности активных центров химического взаимодействия, в которых устанавливаются межатомные металлические связи.

Главным фактором в процессе данного вида сварки является пластическое деформирование, т.е. механическая энергия и давление.



а – исходное состояние; б – г – стадии образования физического контакта и центров взаимодействия; 1 и 3 – свариваемые стержни; 2 – неровности поверхностей после механической обработки; 4 – адсорбированный слой.

Рис.12.5 – Схема процесса образования сварного соединения в твердом состоянии

В результате чего в зонах контакта дробятся и вытесняются адсорбированные включения кислорода, азота, паров воды, жировых загрязнений, происходит смятие выступов и заполнение впадин от шероховатости поверхностей, увеличение активных площадок взаимодействия, сближение атомов до размеров атомных радиусов, обобщение их электронов и образование благодаря этому сварного соединения.

12.4.1 Контактная сварка

Контактная сварка – процесс соединения деталей нагревом их в месте контакта до пластического или жидкого состояния с применением одновременного или последующего сильного сжатия (осадки), обеспечивающего взаимодействия атомов металла.

Контактная сварка – один из высокопроизводительных способов сварки; она легко поддается механизации и автоматизации и ее широко применяется в серийном и массовом производстве для соединения деталей из сталей различных марок и сплавов цветных металлов.

По форме свариваемого соединения, определяющего тип сварочной машины, контактную сварку разделяют на *стыковую, точечную и роликовую*. При всех видах контактной сварки металл нагревается за счет выделения тепла при прохождении электрического тока по свариваемым деталям.

Поскольку сопротивления различных участков сварочной цепи неодинаковы, то и выделяемая теплота различна. Так, в месте контакта свариваемых деталей, где сопротивление максимально, выделяется наибольшее количество теплоты, и металл в этом месте быстрее нагревается до необходимой температуры.

12.4.1.1 Стыковая сварка

При стыковой сварке соединение осуществляется по всей поверхности соприкосновения свариваемых элементов изделия (рис.12.7). Сварку производят на сварочных машинах ручного или автоматического действия.

При этом свариваемые детали закрепляют в зажимах (электродах) стыковой машины и пропускают через них электрический ток большой силы, индуцирующийся во вторичной обмотке трансформатора. Питание трансформатора осуществляется от сети переменного тока. В зоне сварки выделяется тепло и свариваемые детали по стыку разогреваются. Нагретые детали сдавливаются и они свариваются. Различают стыковую сварку сопротивлением и стыковую сварку оплавлением.

Прочность шва стыковой сварки не уступает прочности основного металла и поэтому применяют ее для ответственных соединений.

12.4.1.2 Точечная сварка

При *точечной* сварке изделия свариваются в отдельных точках. Свариваемые изделия устанавливают внахлестку и сжимают усилием между двумя медными электродами, по которым пропускается ток большой силы. Вследствие большого сопротивления место контакта свариваемых частей нагревается, причем внутренние слои нагреваются до расплавления, а внешние до пластического состояния. Это объясняется тем, что контактное сопротивление между электродом и деталью меньше контактного сопротивления между деталями. Кроме того, охлаждаемые водой медные электроды интенсивно отводят теплоту от места их контакта с деталью.

Под действием давления электродов происходит соединение. После выключения тока и снятия давления образуется литая сварная точка.

Точечную сварку широко применяют в массовом и крупносерийном производстве, например, при сварке кузовов легковых автомобилей. Толщина свариваемых металлов в среднем составляет 0,5-6 мм.

12.4.1.3 Роликовая сварка

Роликовую (шовную) сварку осуществляют по линии качения плоских роликов. При прохождении тока через ролики в месте соприкосновения свариваемых частей выделяется тепло, за счет которого и происходит образование сплошного шва. В процессе роликовой сварки листовые заготовки соединяются внахлестку. Как и при точечной сварке внутренние слои нагреваются до расплавления. Толщина свариваемых металлов до 4 мм.

12.4.2 Диффузионная сварка

Эту сварку применяют главным образом для соединения материалов, которые обычными методами сварки соединить трудно или невозможно. При сварке происходит взаимная диффузия атомов в поверхностных слоях контактирующих материалов, находящихся в твердом состоянии и нагретых до температуры ниже температуры плавления металлов. Необходимое для увеличения площади действительного контакта поверхностей давление обеспечивается механическими, пневматическими и другими устройствами. В большинстве случаев диффузионную сварку проводят в вакууме. Свариваемые заготовки устанавливаются внутри камеры, в которой создается

вакуум и нагреваются, чаще всего высокочастотным индуктором, до температуры рекристаллизации. Затем к заготовкам прикладывается небольшое сжимающее давление в течение 5-20 мин.

Преимущества диффузионной сварки - отсутствием плавления металла. Поэтому свойства металла меняются незначительно, вероятность образования трещин минимальна. Диффузионную сварку применяют в радиотехнике, приборостроении, космической технике.

12.4.3 Индукционная сварка

Сварка током высокой частоты (ТВЧ) осуществляется с помощью индуктора. Металл нагревается пропусканием через него индуцированных вихревых токов, которые возникают при прохождении через индуктор переменного тока высокой частоты от ламповых или машинных генераторов. Сварку ТВЧ применяют главным образом при производстве сварных труб. Нагрев токами высокой частоты обеспечивает наибольшую температуру на поверхности свариваемых деталей по сравнению с внутренними слоями. Нагретые заготовки сдавливаются и происходит сварка.

12.4.4 Сварка взрывом

Сущность способа заключается в использовании энергии взрыва, осуществляемого с помощью взрывчатки, которая равномерным слоем укладывается непосредственно на привариваемую деталь. На соединяемые поверхности мгновенно действует образующаяся при взрыве упругая ударная волна, под действием которой происходят соударение свариваемых частей. В зоне соударения металл соединяемых деталей течет подобно жидкости и сливается в одно целое, образуя прочное соединение. Процесс длится тысячные доли секунды. В качестве заряда используют гексоген, имеющий скорость детонации 6600 м/с и давление 12,7 ГН/м².

Этим способом сваривают углеродистые и легированные стали, сплавы цветных металлов, а также разнородные металлы, например медь со сталью, никель со сталью, медь с алюминием, титан с ниобием и другие трудно поддающиеся обычной сварке металлы.

12.4.5 Холодная сварка

Сварка осуществляется без нагрева, путем пластического деформирования металлов в местах сварки. Применяют для соединения металлов, обладающих достаточной пластичностью. Надежность сварного соединения достигается благодаря высокой степени пластической деформации металла в месте контакта соединяемых деталей.

Холодной сваркой могут быть выполнены точечные, шовные и стыковые соединения. По характеру деформации холодная сварка бывает сваркой сдавливанием и сваркой сдвигом.

При подготовке свариваемых поверхностей к холодной сварке необходимо удалить с них органические и адсорбированные пленки. Толщина свариваемых деталей составляет 0,2-15 мм. Прикладываемое

давление зависит от вида и толщины свариваемого материала и колеблется от 150 до 1000 МПа. Холодная сварка высокопроизводительна и легко поддается автоматизации.

12.4.6 Сварка трением

Основана на использовании для нагрева соединяемых деталей превращения механической энергии трения в тепловую.

При сварке трением свариваемые заготовки соприкасаются друг с другом торцами, одной из них придается вращение. Выделяющееся при трении тепло нагревает торцы до пластического состояния, вращение прекращается, заготовки сдавливаются и происходит сварка. Сварка трением позволяет соединять не только однородные, но и разнородные металлы и сплавы с разными свойствами, например медь со сталью, алюминий с медью, титан с алюминием. Этот вид сварки достаточно экономичен, затраты энергии на него в 5-10 раз ниже, чем на контактную стыковую сварку. Этим методом чаще всего сваривают цилиндрические заготовки.

12.4.7 Ультразвуковая сварка.

При ультразвуковой сварке используется давление, нагрев и взаимное трение свариваемых поверхностей. Этим методом соединяют тончайшие пленки (толщиной до 0,001мм) с проводниками, соединяют листы фольги с заготовками неограниченной толщины, сваривают пластмассы между собой и с металлами. Подлежащие сварке поверхности обезжиривают, сжимают в месте сварки и затем к ним с помощью специального инструмента подводят ультразвуковые колебания частотой 15-70 кГц. Вследствие трения одной поверхности о другую в плоскости контакта выделяется тепло, металл под действием сжимающего усилия пластически деформируется и при сближении поверхностей на расстояние действия межатомных сил между ними возникает прочная связь.

Продолжительность сварки 1-3с. Прочность сварки не ниже прочности контактной сварки. Применяют в микроэлектронике и приборостроении при монтаже интегральных схем, герметизации приборов, в авиационной промышленности.

