Глава 25. Механические методы сварки
25.1. Холодная сварка

Холодная сварка — один из видов сварки в твердой фазе со значительной объемной пластической деформацией и малой степенью ее локализации в зоне контакта соединяемых материалов. Она производится при комнатной температуре и для большинства материалов — ниже температуры рекристаллизации. Ряд легкоплавких металлов, например свинец, индий, галлий, имеют температуру рекристаллизации ниже комнатной температуры, поэтому термин «холодная сварка» для этих металлов применим лишь условно.

При сварке металлов в результате значительных пластических деформаций происходит разрушение оксидных пленок, препятствующих сближению атомов чистых поверхностей металла в месте контакта на расстояния, соизмеримые с параметрами кристаллической решетки, и их активация приводит к возникновению металлических связей и образованию сварного соединения.

В соответствии с современной классификацией холодная сварка по форме получаемого соединения может быть точечной, шовной, стыковой (рис. *25.1, а, б, в, г)*, а по характеру деформаций — сваркой сдавливанием (рис. 25.1, *а, б, в, г)* и сваркой сдвигом (рис. 25.1, *д, е)*.

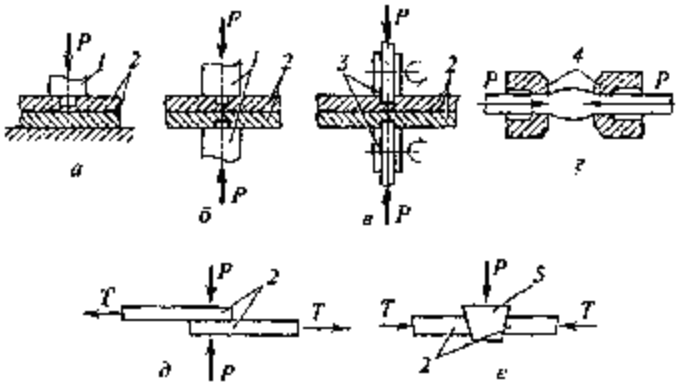

Рис. 25.1. Схема холодной сварки:
а — точечная с одним пуансоном; б — точечная с двумя пуансонами; в — шовная; г — стыковая; д, е — сдвигом; 1 — пуансон; 2 — свариваемые детали; 3 — ролик; 4 — зажимные цанги; 5 — клин

При **точечной** холодной сварке используют в качестве инструмента один или два пуансона цилиндрической формы, а при шовной — в виде роликов. Более высокой и стабильной прочность соединения получается при сварке двумя пуансонами или роликами. Пуансоны и ролики рекомендуется изготавливать с уступом. При холодной сварке деталей, особенно больших толщин, когда пуансон внедряется в толщу деталей, последние могут сильно деформироваться, уступы на цилиндрических пуансонах и роликах в завершающий момент прижимают детали и ограничивают их деформацию.

Если изделия выполнены из материалов сравнительно малой пластичности (нагартованные алюминиевые сплавы, медь и др.) толщиной более 4 мм, то из-за деформации деталей в процессе сварки каждой последующей точки может быть даже разрушена предыдущая точка. Для устранения этого явления производят холодную сварку с предварительным зажатием. Прижимами детали фиксируются еще до начала сварки или одновременно с ней. Таким образом предупреждаются не только остаточные деформации, но и деформации в процессе самой сварки. Сварка с предварительным зажатием позволяет получать соединения более прочные, чем при сварке по обычной схеме.

При **стыковой** сварке детали прочно закрепляются в зажимных цангах, внутренняя рабочая поверхность которых имеет насечку, препятствующую проскальзыванию деталей при их сдавливании.

При холодной сварке **сдвигом** наряду с нормальными усилиями, сдавливающими соединяемые детали, прикладываются дополнительные усилия, обеспечивающие относительное смещение свариваемых поверхностей.

Это достигается приложением силы *T* (рис. 25.1, *д)* или использованием клиновидной прокладки (рис. 25.1, е), впрессовываемой с усилием между деталями в зазор аналогичной конфигурации.

Сдавливание и одновременно сдвиг по свариваемым поверхностям способствуют лучшему разрушению оксидных пленок, облегчают смятие неровностей, что приводит к более полному физическому контакту между деталями, расширяют площадь соприкосновения чистых свариваемых поверхностей при меньшей величине нормальных усилий. Последнее особенно важно при изготовлении с помощью холодной сварки деталей большого сечения.

Параметрами режимов холодной сварки являются удельное давление, величина вылета деталей из цанг (при стыковой сварке), диаметр пуансона, степень деформации.

Степень пластической деформации, необходимая для получения качественного соединения, зависит от свойств металла, толщины соединяемых деталей, способа подготовки поверхностей под сварку, толщины и свойств оксидной пленки, схемы деформирования.

Большое влияние на степень деформации оказывает соотношение твердости оксидной пленки к твердости основного металла: степень деформации должна быть тем больше, чем меньше это соотношение. При сварке разнородных материалов степень деформации определяют исходя из свойств наиболее пластичного металла.

Основная трудность подготовки поверхности деталей под холодную сварку заключается в тщательном удалении с нее органических и адсорбированных пленок.

Холодной сваркой успешно соединяют металлы, обладающие хорошими пластическими свойствами, такие, как алюминий, свинец, олово, медь, цинк, кадмий, никель и другие, а также их сочетания. Этот способ сварки нашел применение главным образом в приборостроении. Стыковая и точечная сварка применяется также для соединения проводов и шин при монтаже электросхем.

Одним из направлений применения холодной сварки является сочетание ее с обработкой давлением: прокаткой, высадкой, штамповкой, вытяжкой и т. п. С помощью последней, например, получают биметаллические переходники из алюминия и коррозионностойкой стали, которые затем используются в бесфланцевых соединениях трубопроводов.

25.2. Сварка взрывом

Взрывчатое вещество (ВВ) обычно укладывают равномерным слоем непосредственно на деталь (рис. 25.2, *а, в),* иногда для некоторого смягчения удара между зарядом и деталью помещается прокладка из резины или пластика (рис. 25.2, *г).* Образование соединения происходит в результате соударения верхней (метаемой) пластины с нижней. Ударной волной взрыва осуществляется и необходимая для сварки очистка от загрязнений свариваемых поверхностей.

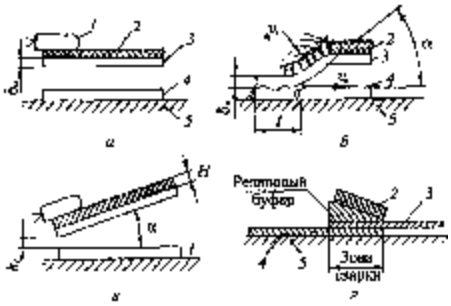

Рис. 25.2. Схема сварки взрывом:
а, в — исходное положение деталей; *б* — установившийся процесс сварки; *г* — сварка без начального зазора; *1*— детонатор; *2* — взрывчатое вещество; *3* — верхняя деталь; *4* — нижняя деталь; 5 — основание

Более подробно процесс сварки взрывом и некоторые его закономерности можно представить следующим образом. После инициирования детонатором взрыва заряда ВВ с огромной скоростью по нему распространяется плоская детонационная волна. Позади движущейся плоской детонационной волны остаются продукты взрыва, давление при этом составляет 10—20 ГПа. За счет этого части верхней детали, расположенной в зоне действия продуктов взрыва, сообщается ускорение в направлении к неподвижной детали. Силовое воздействие на участки верхней пластины происходит последовательно по мере перемещения фронта детонации, и в любой промежуточный момент времени установившегося процесса сварки положение свариваемых деталей будет таким, как показано на рис. 25.2, *б.* Та часть верхней

пластины, где детонация ВВ еще не произошла, находится в исходном положении параллельно нижней, а где прошел фронт детонации, пластины будут уже сварены (участок между точками *А* и *В*). В итоге верхняя пластина получит в процессе сварки двойной изгиб, причем точка *В* непрерывно и с большой скоростью переместится вправо. При параллельном положении пластин до сварки скорость перемещения точки *В* (υ_c) равна скорости детонации ($\upsilon_д$).

При соударении свариваемых пластин в металле возникает упругая ударная волна, а затем, если давление достаточно и превышает некоторое критическое значение, — пластическая. Под влиянием последней увеличивается число дислокаций и, следовательно, число активных центров, что стимулирует процесс взаимодействия между свариваемыми поверхностями. Именно дислокационный механизм взаимодействия наиболее часто встречается при объяснении сущности образования соединения при сварке взрывом.

Удаление оксидов происходит под воздействием кумулятивной (направленной) воздушной струи, которая образуется при сближении с огромной скоростью свариваемых деталей. Скорость самой струи достигает 6000—7000 м/с, поэтому она оказывает большое давление на металл.

Как показывает практика, поверхность лучше очищается при сварке де- талей, предварительно наклоненных на некоторый угол α (рис. 25.2, *в*).

Обычно детали располагают друг относительно друга под углом а = 2—15° и с первоначальным зазором h_o = 2—3 мм. Однако возможна сварка взрывом деталей и без зазора (рис. 25.2, *г*). В таком случае детали свариваются, очевидно, вследствие некоторого относительного сдвига, а также зазора, который образуется под неизбежной деформацией нижней пластины и основания, на котором она находится.

За счет энергии взрыва сварка может происходить практически по неограниченной поверхности. Таким образом получают биметаллические материалы.

С помощью сварки взрывом сваривают детали и более сложной формы (например, заготовки биметаллических переходников для бесфланцевого соединения трубопроводов из разнородных металлов), различные теплообменники, в массивные плиты которых приходится вваривать большое число тонкостенных трубок, облицовывают цилиндрические детали. Сварка плавлением из-за существенной разницы толщин свариваемых деталей достаточно трудна, поэтому сварка взрывом для подобных конструкций является одной из наиболее рациональных. Кроме того, эта сварка применяется для некоторых композиционных материалов.

В последнее время сварка взрывом (так же, как и холодная) применяется в сочетании со штамповкой. При штамповке взрывом многослойных деталей в ряде случаев осуществляют одновременно и сварку по поверхности их контакта.

25.3. Ультразвуковая сварка

Соединение при этом методе сварки образуется под влиянием давления и ультразвуковых колебаний (рис. 25.3).

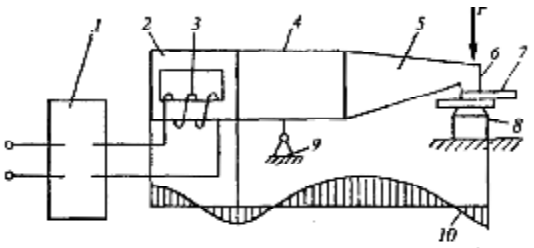

Рис. 25.3. Схема ультразвуковой сварки

Ультразвуковые колебания в сварочных установках получают следующим образом. Ток от генератора *1* высокой частоты подается на обмотку *3* магнитострикционного преобразователя *2*, который собирается из пластин толщиной 0,1—0,2 мм. Материал, из которого они изготовлены, способен изменять свои геометрические размеры под действием переменного магнитного поля. Если магнитное поле направлено вдоль пакета пластин, то любые его изменения приведут к укорочению или удлинению магнитостриктора, что позволит преобразовать высокочастотные электрические колебания в механические той же частоты.

Преобразователи ультразвуковых колебаний с помощью припоя или клея соединяются с волноводом *4*. Волновод передает колебания концентратору *5*. Волновод цилиндрической формы не изменяет амплитуды колебаний, в то время как ступенчатые, конические концентраторы усиливают их. Поэтому выбирается специальная форма концентратора, а его размеры рассчитывают с учетом необходимого коэффициента усиления.

Размеры волноводной системы подбираются так, чтобы в зоне сварки был максимум амплитудного значения колебаний (рис. 25.3, кривая *10)*.

За счет поворота волновода вокруг опоры *9* сваривающий выступ *6* (наконечник) прижимает детали 7 друг к другу и к нижней опоре — электроду *8* с усилием *P*, создаваемым механизмами пневматического или рычажно-грузового типа.

В итоге к деталям, находящимся под давлением, через концентратор подводятся продольные, сдвиговые колебания. Сварное соединение образуется в результате совместного воздействия давления и колебаний при сдвиге.

Наиболее рационально применение сварки ультразвуком в следующих областях.

1. Сварка деталей малых толщин. При этом ультразвуковая сварка имеет определенные преимущества, например, перед конденсаторной. Эти преимущества обусловлены тем, что при одинаковой толщине деталей диаметр точки при сварке ультразвуком можно получить больше, чем при конденсаторной сварке, также применяемой для соединения деталей малых толщин.

Сварка деталей разных толщин и разнородных металлов, которые не свариваются или трудно свариваются другими методами. Существенные успехи достигнуты при сварке ультразвуком металлов с неметаллами (полупроводниками, стеклом и некоторыми другими материалами). Это обеспечило применение ультразвуковой сварки в электронной и радиотехнической промышленности. С помощью ультразвука сваривают детали из пластмасс. Ультразвуковая сварка наряду с лазерной применяется для соединения биологических тканей, что является уникальным примером использования сварки ультразвуком и одновременно характеризует ее широкие возможности.

3. Сварка деталей из термообработанных материалов. Отсутствие значительного нагрева не приводит к заметному понижению прочности металла околошовной зоны. Сварка без предварительной зачистки поверхности деталей, защищенных покрытиями (плакирование, анодирование). Сварка ультразвуком более экономична с точки зрения затрат электроэнергии. Однако недостатки ультразвуковой сварки существенно сужают область ее применения: толщина свариваемых деталей ограничена 1,5—2 мм; наблюдается неустойчивость параметров режимов сварки и, как следствие, нестабильность прочности сварных соединений, устранить которые и надежно проконтролировать методами неразрушающего контроля довольно сложно.

25.4. Сварка трением

Метод основан на образовании сварного соединения под влиянием давления и нагрева, при котором нагрев осуществляется трением, вызываемым вращением одной из свариваемых деталей. Вследствие нагрева достигаются значительные пластические деформации при меньших давлениях.

Образование прочного соединения происходит в результате возникновения металлических связей между чистыми контактирующими поверхностями. Неровности, различные включения и пленки, препятствующие образованию этих связей, разрушаются при трении и удаляются из зоны сварки в процессе пластической деформации, протекающей в радиальном направлении. Интенсивная очистка поверхности от оксидных и адсорбированных пленок позволяет не только обеспечивать возможность сварки, но и получать высокопрочные соединения. Схемы различных видов сварки трением приведены на рис. 25.4.

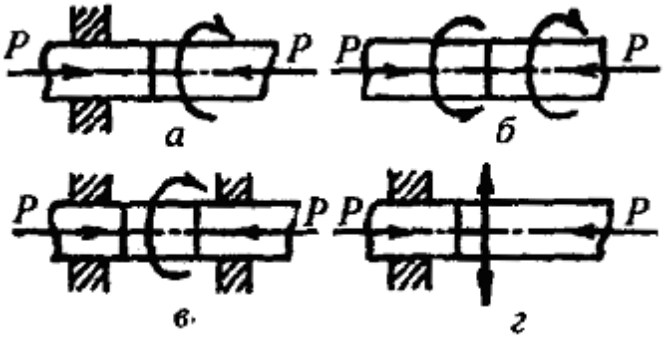

Рис. 25.4. Принципиальная схема сварки трением:
а — вращение одной детали; *б* — вращение обеих деталей; *в* — сварка неподвижных деталей с вращающейся вставкой; *г* — сварка при возвратнопоступательном движении одной из деталей

Основными параметрами режима сварки трением являются: частота вращения свариваемых деталей, величина осевого усилия при нагреве, величина осадки при нагреве, величина осевого усилия проковки, длительность приложения усилия проковки. В качестве параметра режима сварки можно использовать длительность нагрева.

Для облегчения процесса сварки трением, в частности для более равномерного нагрева деталей, имеющих различную конфигурацию и массу, рекомендуется предусматривать специальные выступы или проточки.

Возможность сварки трением деталей из самых разнообразных материалов, в том числе из разнородных, экономичность, высокая производительность и качество соединения — характерные особенности этого процесса, применяемого в машиностроении при изготовлении ряда ответственных деталей.

Большой экономический эффект достигнут при внедрении сварки трением заготовок различного режущего инструмента для цехов механической обработки.

Ограничивают область применения сварки трением путем вращения, специфические требования к конфигурации деталей — одна или обе детали должны быть телом вращения.

25.5. Магнитоимпульсная сварка

Соединение образуется в результате соударения соединяемых частей, вызванного воздействием импульсного магнитного поля. Принципиальная схема сварки импульсным магнитным полем приведена на рис. 25.5.

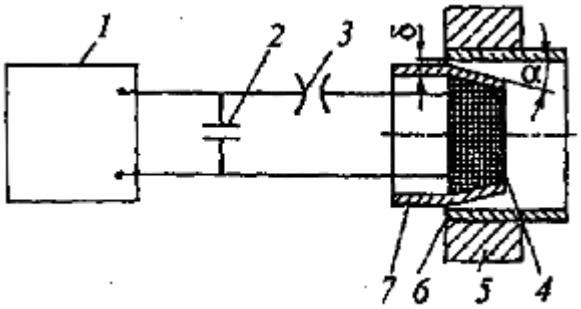

Рис. 25.5. Схема магнитоимпульсной сварки

Детали 7 и 6 устанавливают так, чтобы свариваемые поверхности находились внахлестку под углом друг к другу и с зазором между ними. Магнитная катушка *4* размещается внутри детали на поверхности, противоположной свариваемой. Последняя располагается под некоторым углом к детали *2*, установленной в опоре *5*. После зарядки конденсаторной батареи *2* от зарядного устройства *1* коммутирующее устройство *3* осуществляет его разрядку на

катушку *4*, вокруг которой образуется магнитное поле. Его силовые линии пересекают деталь 7 и индуцируют в ней вихревые токи. Последние создают собственное магнитное поле вокруг детали. Взаимодействие магнитных полей катушки и детали приводит к отталкиванию детали от катушки. В результате возникает сила, которая придает ускорение детали 7 в направлении детали *6*. При их соударении достигается давление, необходимое для сварки. Кратковременностью действия импульса, динамическим характером процесса магнитоимпульсная сварка напоминает сварку взрывом. Строение металла в зоне контакта после сварки этими методами тоже имеет много общего. Так, в обоих случаях соединение получается волнистым. Очевидно, схожим должен быть и механизм удаления оксидной пленки и образований металических связей. Длительность импульсов при магнитоимпульсной сварке и сварке взрывом составляет 10—100 мкс, т. е. они примерно одинаковы, однако давление при сварке взрывом на порядок выше.

Кроме рассмотренной схемы сварки применяется и другой вариант, когда катушка индуктивности охватывает наружную деталь, метаемую магнитным полем в направлении внутренней детали. Если внутренняя деталь тонкостенная, то в нее вставляется опорная втулка, препятствующая ее смятию. Схема сварки с наружным расположением индуктора позволяет сваривать не только полые детали, но и полые детали со сплошными, например с осями, валиками, тягами и т. а

Магнитоимпульсная сварка — это высокопроизводительный процесс, обеспечивающий хорошее качество сварного соединения, в том числе герметичность, вибро- и термостойкость. Кроме сварки деталей из одинаковых металлов возможна сварка разнородных материалов, таких, как алюминий— медь, алюминий—коррозионностойкая сталь, цирконий—коррозионностой-кая сталь. Кроме того, магнитоимпульсная сварка (по сравнению со сваркой взрывом) проще с точки зрения соблюдения техники безопасности.

Контрольные вопросы

1. Какова сущность образования соединений при механических способах сварки?
2. Как удаляется оксидная пленка при различных механических способах сварки?
3. При ультразвуковой сварке каких материалов в сварном соединении необходимо создавать касательные, а каких — нормальные напряжения?
4. Почему при конденсаторной сварке (в отличие от ультразвуковой) не удается получить достаточно большой диаметр сварной точки при соединении деталей малых толщин?
5. Каковы основные области применения механических способов сварки?