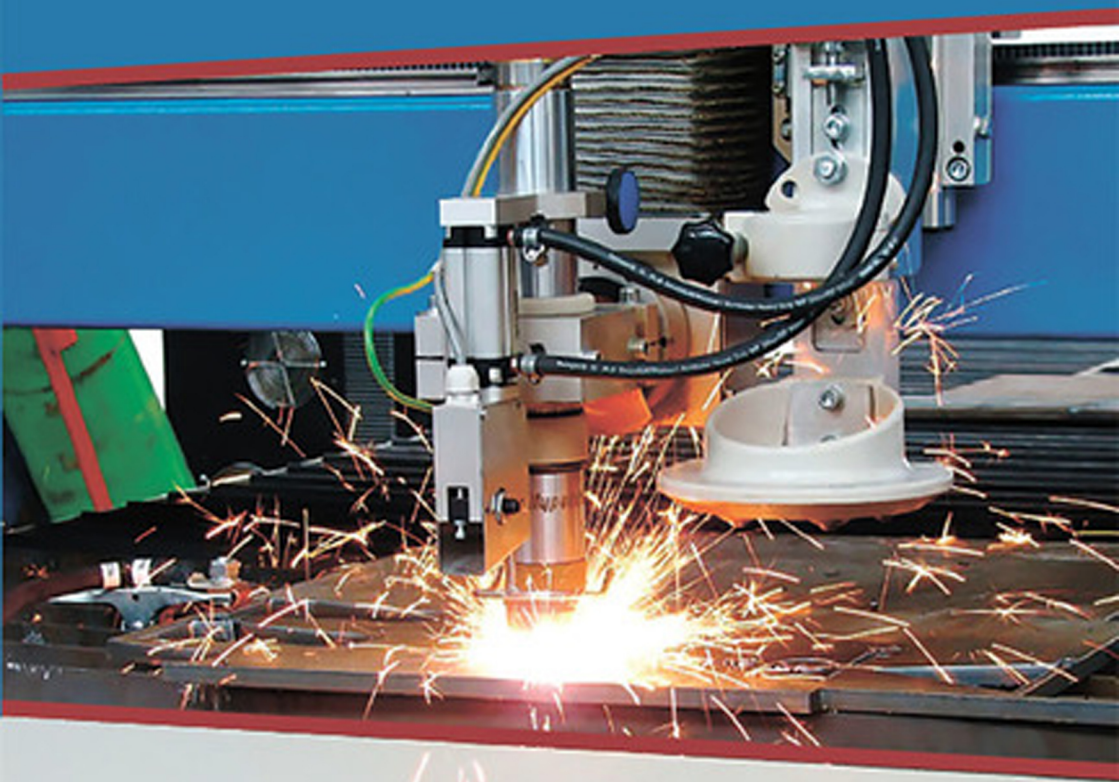


СВАРОЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Под редакцией доктора технических наук
В. А. Ленивкина



«Инфра-Инженерия»

УДК 621.791.03 (075.8)
ББК 30.61я73
С24

Авторы:

В. А. Ленивкин, Д. В. Киселёв, В. А. Софьяников, А. И. Никашин

Рецензент:

доктор технических наук, профессор И. С. Морозкин
(РГУПС, г. Ростов-на-Дону)

С24 Сварочные процессы и оборудование : учебное пособие /
[В. А. Ленивкин и др.] ; под ред. д-ра техн. наук В. А. Ленивкина. –
Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. – 308 с. : ил., табл.
ISBN 978-5-9729-0401-3

Описаны разновидности процессов сварки давлением (холодная сварка, сварка взрывом, магнитно-импульсная, ультразвуковая, индукционная, диффузионная, сварка трением), плавлением (плавящимся и неплавящимся электродами в различных защитных средах и под флюсом), концентрированными источниками энергии (лазерная и электронно-лучевая), а также сварка пластмасс. Указаны особенности применения процессов сварки в различных отраслях производства, описано необходимое оборудование.

Для студентов бакалавриата и магистратуры, обучающихся по направлению «Машиностроение» по профилю «Технология и оборудование сварочного производства».

УДК 621.791.03 (075.8)
ББК 30.61я73

ISBN 978-5-9729-0401-3

© Издательство «Инфра-Инженерия», 2020

© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2020

Глава 1. ОСНОВНЫЕ ДАННЫЕ ФИЗИКИ ТВЁРДОГО ТЕЛА О СТРОЕНИИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

1.1. Виды элементарных связей в твердых телах и монолитных соединениях

Монолитность сварных соединений твердых тел обеспечивается атомно-молекулярными связями между элементарными частицами соединяемых веществ.

Твердое тело представляет собой комплекс атомов, находящихся во взаимодействии. Тип химической связи атомов и характер их взаимного расположения определяют физико-химические и прочностные свойства твердого тела. Для рассмотрения природы сварного соединения необходимо вспомнить некоторые сведения из физики твердого тела.

Характер и величина энергии (прочность) элементарных связей зависят от природы вещества и типа кристаллической решетки твердого тела. Согласно современным представлениям, химическая связь атомов возникает в результате движения электронов внешних (валентных) оболочек атома в поле между ядрами. Каждый из этих электронов, проникая, например, в поле двух ядер, принадлежит уже обоим атомам. Химические силы по своей природе являются электромагнитными и действуют на расстоянии порядка 10^{-8} см = 1 Å.

В химии различают *четыре типа элементарных связей*: ковалентную, ионную, межмолекулярную (Ван-дер-Ваальса) и металлическую. В зависимости от преобладающих элементарных связей кристаллы также различают соответственно по четырем группам: атомные, ионные, молекулярные и металлические.

Наиболее типичными химическими связями являются первые две связи: ковалентная и ионная. Монолитность сварных соединений твердых тел обеспечивается появлением атомно-молекулярных связей между элементарными частицами соединяемых веществ.

Ковалентную химическую связь в литературе часто называют валентной, атомной или обменной связью. Она может образоваться путём взаимодействия или «спариванием» валентных электронов. Сильная ковалентная связь с

энергией порядка 10^5 Дж/моль определяет высокую температуру плавления и прочность кристаллов. Ковалентной связью обусловлены структуры так называемых атомных кристаллов - алмаза, кремния, германия, серого олова и т.д.

Число образуемых атомами ковалентных связей в первом приближении может служить количественной мерой валентности. Каждая ковалентная связь между атомами образуется при спаривании их валентных электронов (с противоположными спинами). Поскольку валентные возможности атомов ограничены, важнейшим свойством ковалентной связи является ее насыщаемость.

При сварке прочные связи ковалентного типа устанавливаются не только в атомных кристаллах, но и при соединении металлов с металлоидами, оксидами металлов, а также полупроводниками или интерметаллидами, обладающими полупроводниковыми свойствами.

Интерметаллиды – соединения типичных металлов с металлами, имеющими слабые металлические свойства.

Когда соединяемые вещества способны к донорно-акцепторному взаимодействию, устанавливается так называемая координационно-ковалентная связь. Примером служит соединение основных оксидов с кислотами, таких, как $\text{Ca}^{+2} \text{O}^{-2}$, где ион кислорода является донором по отношению к атому, образующему кислотный оксид, такой, как $\text{Si}^{+4} \text{O}_2^{-4}$. При непосредственном соединении металлов с керамиками, имеющими в составе кислые оксиды, координационно-ковалентная связь легче образуется тогда, когда на поверхности металла создан тонкий слой низших основных оксидов, обладающих донорными свойствами.

Ионная, или гетерополярная, связь типична для молекул и кристаллов, образованных из разных ионов (анионов и катионов). Образование положительного катиона - результат ионизации атома. Мерой прочности связи электрона в атоме может служить потенциал ионизации атома.

Типичный представитель ионных кристаллов – соль NaCl . Образование отрицательных анионов происходит в результате присоединения электрона к атому. Мерой способности к такому присоединению служит так называемое сродство к электрону. Ионная связь также является сильной, с энергией около $10^5 \dots 10^6$ Дж/моль. Особенностью ионной связи является отсутствие насыщаемости и пространственной направленности.

Представления о чисто ковалентной и чисто ионной связи в значительной степени идеализированы. Часто встречаются промежуточные случаи. Если при

ионной связи один атом целиком отдает электрон другому, а при ковалентной связи каждый электрон принадлежит поровну обоим связанным атомам, то в промежуточных случаях возможны связи с любым «процентом ионности».

Кроме двух наиболее типичных химических связей: ковалентной и ионной – различают молекулярные связи за счет универсальных сил Ван-дер-Ваальса и металлические связи.

Силы Ван-дер-Ваальса действуют между любыми атомами и молекулами, но они очень малы (порядка 10^3 Дж/моль). Поэтому молекулярные кристаллы, обусловленные этими силами (твердые инертные газы, молекулы кислорода, азота и т.д.), отличаются весьма низкой температурой плавления (He – 1,8 К; Ar – 40 К). Образование прочных структур обусловлено главным образом сильными типично химическими связями, например, ковалентной, а силы Ван-дер-Ваальса служат лишь небольшой «добавкой». Силами Ван-дер-Ваальса обусловлены обычно адгезионные связи при склеивании, смачивании твердых тел жидкостями и т.п.

Металлические связи образуют структуры путем взаимодействия положительных ионов решетки (атомных остатков) и делокализованных, обобществленных электронов. Эти связи являются гомеоплярными. Они, по существу, не относятся к химическим связям, и понятие металлической связи можно считать качественным, так как металлы обычно не имеют молекулярного строения, а их атомы соединяются в кристаллические образования. Носителем свойств вещества в этом случае является не молекула, а фаза. Этот вид связи и обуславливает высокую прочность, пластичность и электропроводность металлов. Энергия связи – около 10 Дж/моль. Прочная металлическая связь наблюдается при образовании интерметаллидов и некоторых твердых растворов. Одна из ее особенностей – отсутствие насыщения, определяемого валентностью соответствующих атомов.

Металлическая связь по своей природе имеет значительное сходство с ковалентной связью. В обоих случаях электронные орбиты сливаются, но в металле происходит обобщение не отдельных, а всех валентных электронных орбит. При этом устанавливаются общие уровни энергии во всем объеме кристалла. Число уровней будет одного порядка с числом атомов в данном объеме металла. Уровни весьма близки между собой и образуют энергетические полосы

или зоны, которые иногда рассматривают как расщепление валентных уровней (орбит) отдельных атомов.

Поскольку в металле существует как бы «облако» обобщенных электронов, металлическая связь не направлена в пространстве, как ковалентная, не насыщаемая и допускает большее смещение атомов, чем другие типы связей. Этим обуславливается высокая пластичность металлических кристаллов по сравнению с валентными или ионными кристаллами.

Все четыре типа связи в кристаллах (атомных, ионных, молекулярных и металлических) *редко существуют в чистом виде*. Обычно встречаются сочетания связей одновременно, причем, как уже отмечалось, молекулярные связи являются слабыми по сравнению с остальными тремя. Следует также отметить, что поверхности твердых тел в атмосферных условиях обычно инертны, так как валентности их атомов насыщены связью с атомами окружающей среды. Примером насыщения может служить окисление веществ в газовой среде. На поверхности могут также идти процессы типа физической адсорбции, обусловленные силами Ван-дер-Ваальса.

Схема основных видов адсорбционных слоев на поверхности металла может быть проиллюстрирована рис. 1.1.

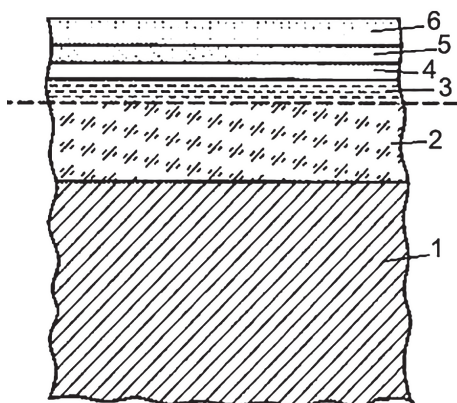


Рис. 1.1. Схема основных видов адсорбционных слоев на поверхности технического металла: 1 – первичная объемная структура металла; 2 – зона деформированного металла; 3 – слой окислов металла; 4 – адсорбционный слой газов; 5 – адсорбционный слой воды; 6 – адсорбционный слой полярных молекул органического вещества (смазки)

Непосредственно над ювенильной (физически и химически чистой) поверхностью металла обычно находится слой его оксидов, имеющий толщину нескольких ангстремов ($1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ см}$). На поверхности окисленного слоя в зависимости от внешних условий могут присутствовать адсорбционные слои газов (воздуха), адсорбционные слои молекул воды, адсорбционные слои полярных и неполярных молекул органических веществ (жиры, смазка).

При сварке плавлением наличие этих тонких слоев принципиального значения не имеет, поскольку они вместе с основным металлом переплавляются и удаляются из жидкой сварочной ванны за счет металлургических реакций. При сварке давлением их удаление перед сваркой или в ходе сварки представляет определенную проблему. Только их полное удаление создает предпосылки для установления нормальных химических связей в контакте кристаллических решеток свариваемых материалов. Большое значение при этом приобретает тип, ориентация и параметры кристаллических решеток, в связи с чем целесообразно рассмотреть эти вопросы.

1.2. Кристаллическая решетка металлов

Кристаллическая решетка представляет собой закономерное расположение атомов в пространстве относительно друг друга. Атомы не являются неподвижными даже при температуре абсолютного нуля по Кельвину, а совершают колебательные движения около мест устойчивого равновесия, называемых узлами кристаллической решетки. Наименьший комплекс атомов, путем многократного повторения (трансляции) которого можно воспроизвести кристаллическую решетку, называется элементарной ячейкой. Как доказал выдающийся русский кристаллограф Е.С. Федоров (XIX в.), существует 230 типов геометрического расположения атомов в кристаллах. Однако в металлических кристаллах обычно наблюдаются три типа решеток: объемно-центрированная кубическая решетка (ОЦК), гранецентрированная кубическая решетка (ГЦК) и гексагональная плотно упакованная решетка (ГПУ).

Решетка ОЦК характерна, например, для железа и сталей при комнатной температуре, хрома, β -титана и его сплавов, *W, Mo, Nb, Ta*; ГЦК решетка – для γ -железа (при $T > 911 \text{ }^\circ\text{C}$), *Ni, Cu, Al, Ag, Au*; ГПУ решетка – для α -титана

(при $T < 882\text{ }^{\circ}\text{C}$), *Co*, *Mn*, *Zn*. Элементарные ячейки этих решеток показаны на рис. 1.2.

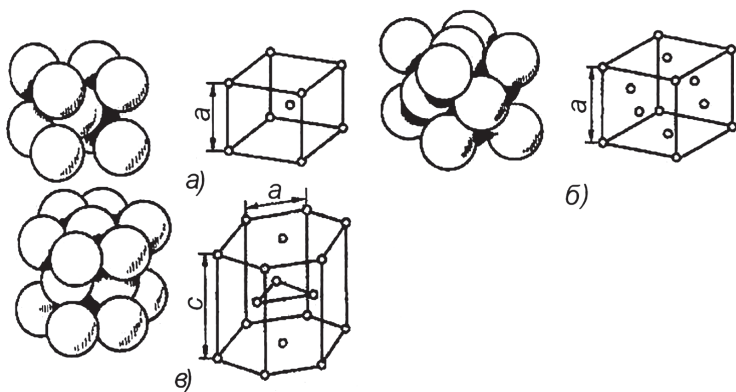


Рис. 1.2. Кристаллические решетки (слева изображение в виде плотно упакованных шаров-атомов): а – объемноцентрированная кубическая (ОЦК); б – гранецентрированная кубическая (ГЦК); в – гексагональная плотно упакованная (ГПУ)

Кристаллические решетки отличаются друг от друга следующими характеристиками: параметром a – расстояние между центрами атомов вдоль ребра куба (для кубических решеток); для ГПУ решетки принято 2 параметра – a и c (рис.1.2, в); координационным числом (КЧ) – числом ближайших соседей выбранного атома, находящихся на одинаковом расстоянии от него (для ОЦК КЧ – 8, для ГЦК – 12, для ГПУ – 12); плотностью упаковки (для ОЦК - 0,68, для плотно упакованных решеток ГЦК и ГПУ – 0,74).

ПУ – это отношение объема, занятого атомами, ко всему объему кристаллической решетки; 0,74 – максимально возможная величина. Иногда пользуются и такой характеристикой, как количество атомов, приходящихся на элементарную ячейку. Например, для ОЦК решетки: 8 угловых атомов, каждый из которых принадлежит 8 элементарным ячейкам, дают $1\left(8 \times \frac{1}{8} = 1\right)$ плюс 1 центральный атом. Итого, всего 2 атома на элементарную ячейку. Для ГЦК решетки: вклад каждого углового $8 \times \frac{1}{8}$, всего 1 от 8 угловых плюс 6 атомов в центре граней, каждый из которых принадлежит двум ячейкам, дают $6 \times \frac{1}{2} = 3$. Всего на ячейку $1 + 3 = 4$. Для ГПУ тоже 4.

Анализ рис. 1.2 показывает, что кристаллографические плоскости и направления упакованы атомами неравномерно. Имеются более и менее плотно упакованные кристаллические решетки, что сильно влияет на вектор предпочтительной пластической деформации. Например, в плоскости передней грани ОЦК атомы находятся на расстоянии a , т.е. параметра кристаллической решетки, а в диагональной плоскости, в которой находится центрирующий куб атом, – на расстоянии $a \times \frac{\sqrt{2}}{2}$, то есть вторая плоскость упакована плотнее, чем первая. Аналогично и в отношении кристаллографических направлений. Например, в направлении ребра куба атомы расположены на расстоянии a друг от друга, а в направлении пространственной диагонали – на расстоянии $a = \frac{\sqrt{3}}{2}$. Поэтому для обозначения кристаллографических плоскостей и направлений в решетке принята система индексов Миллера.

Контрольные вопросы:

1. Укажите типы химических связей.
2. Дайте определение понятия «интерметаллиды».
3. Дайте определение понятия «ионная (гетерополярная) связь».
4. Что такое «силы Ван-дер-Ваальса»?
5. Когда и как действуют металлические связи?

Глава 2. ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ СХЕМЫ МЕТОДОВ СВАРКИ ДАВЛЕНИЕМ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

2.1. Методы сварки давлением.

Основные и дополнительные технологические параметры

При различных методах сварки давлением неразъемные соединения металлов, металлов с неметаллическими материалами и неметаллов друг с другом осуществляются в твердом состоянии в результате термомеханического или механического воздействия на соединяемые материалы в зоне контакта. Поэтому основными технологическими параметрами процессов сварки являются давление (P) и температура (T).

Под действием этих параметров соединяется большинство конструкционных одноименных и разноименных металлов. Под действием давления P качественные соединения металлов формируются при холодной сварке (ХС), сварке взрывом (СВз), магнитно-импульсной сварке (МИС) и вакуум-термической магнитно-импульсной обработке (ВТМИО). При этих методах определяющим фактором образования таких соединений является взаимное механическое взаимодействие в зоне контакта. Эти процессы можно отнести к P -процессам.

При ударной сварке в вакууме (УСВ) и индукционной сварках (ИС) соединения металлов образуются за счет уже термомеханического воздействия, так как металлы перед контактированием нагреваются до пластического состояния в зоне контакта. Эти методы сварки относят к P , T -процессам. ИС успешно применяется для сварки пластмасс и синтетических тканей.

Для соединения металлов и металлов с неметаллическими материалами начинают применяться процессы сварки с дополнительными интенсифицирующими воздействиями, в том числе при пониженных температурах и давлениях, ультразвуком, циклическом изменении давления и температуры, с электростатическими и магнитными полями, крутильными колебаниями, радиационным и ударным воздействием и др. Параметры этих воздействий обозначают как f -параметры.

Сварка давлением применяется с использованием различных защитных сред: вакуума, водорода, растворов солей и определяется P -, T -, A -параметрами.

Наиболее характерным примером данной группы процессов является прокатка металлов в вакууме. К этой группе процессов относится термокомпрессионная сварка (ТКС).

Одним из направлений развития техники в последнее десятилетие является разработка таких способов сварки, которые позволяют соединять тугоплавкие металлы, металлы с конструкционными функциональными неметаллическими материалами (керамикой, ферритами, ситаллами, стеклами, полупроводниками и др.) при пониженных температурах и давлениях. При создании современных приборов и устройств актуальной становится проблема соединения этих материалов друг с другом. Разработка таких способов сварки требует дополнительных интенсифицирующих параметров и защитных средств. Например, использование для активации процесса взаимодействия взрывающихся прослоев (СВЗП) в вакууме. Этот метод позволяет соединять при температурах 200...300 °С в вакууме практически все металлы и металлы с неметаллами, керамику с ферритами, стекло с полупроводниками, драгоценные камни друг с другом. Поэтому сварку материалов через взрывающиеся прослои возможно выделить в отдельную группу Р, Т, А, f-процессов. К этой же группе можно отнести и сварку импульсным электрическим разрядом в жидкости (СИЭЖ).

Многие способы сварки давлением позволяют получать качественные соединения практически мгновенно. При некоторых способах сварки, в частности диффузионной, время воздействия технологических параметров t существенно влияет на кинетику и полноту протекания физико-химических процессов в контактной зоне, ответственных за получение качественных соединений.

Диффузионная сварка (ДС) является наиболее универсальным процессом по возможности применения всех рассмотренных основных (Р, Т) и дополнительных (f, А) параметров и с учетом времени их воздействия t может быть отнесена к Р, Т, А, f, t – процессам, т.е. она является наиболее универсальным и разносторонним способом сварки.

Этот способ предложен и разработан в Советском Союзе Н.Ф. Казаковым. Его отличительные особенности следующие:

- сварка как металлических, так и неметаллических материалов ведется в твердом состоянии при температуре 0,5...0,9, температуре плавления более легкоплавкого из соединяемых материалов;

- прикладываемое к свариваемым деталям давление не превышает обычно величины предела текучести более пластичного из соединяемых материалов, что позволяет получать прецизионные соединения;

- изотермическая выдержка под давлением при температуре сварки составляет, как правило, минуты – десятки минут. В этих условиях достаточно активно протекают диффузионные процессы в контактной зоне;

- сварка ведется в вакууме, в восстановительных или защитных средах, что исключает окисление поверхностей и создает условия для их очистки при сварке.

Основным достоинством ДС является ее способность соединять без применения припоев, флюсов и без ограничения соотношения толщин разнообразные металлические материалы, а также металлы с керамикой, стеклами, керамиками и др. Это позволяет изготавливать узлы различных приборов, а также получать биметаллы, триметаллы и более сложные композиционные материалы. ДС позволяет успешно решить проблему получения сварных соединений по всем характеристикам (прочность, пластичность, термостойкость, электропроводность), идентичным исходным материалам.

ДС позволяет соединять детали и узлы с высокой размерной точностью по плоской, конической, сферической и сложной рельефной поверхностям. Применение ДС взамен пайки позволяет существенно повысить качество и долговечность приборов и устройств в различных отраслях техники.

Разделение сварки давлением на отдельные группы процессов по технологическим параметрам является достаточно условным, так как наряду с основными параметрами, определяющими процесс взаимодействия, в последнее время применяются при большинстве сварок все более разнообразные методы дополнительной интенсификации. Например, при СТ используют ротационное воздействие, при ДС – различные прослойки из перфорированных материалов, циклическое изменение давления и температуры, радиационное воздействие и др. Тем не менее, каждый из указанных P , T , f , A и t -параметров может оказывать воздействие на процессы соединения материалов в твердом состоянии, влиять на соотношение этих параметров в зависимости от свойств соединяемых материалов, вызывать необходимость создания принципиально нового перспективного оборудования, в котором предусмотрено сочетание и наличие этих параметров, определить вид получаемого соединения, его эксплуатационные и

экономические характеристики. Все эти параметры могут служить основой для классификации методов сварки давлением по видам вводимой энергии и дополнительных интенсифицирующих параметров энергетического и технологического взаимодействия при соединении металлов, металлов с неметаллами и даже неметаллических материалов друг с другом.

2.2. Р-процессы

Способы сварки с приложением давления (Р-процессы): холодная, взрывом, магнитно-импульсная сварки и вакуумно-термическая магнитно-импульсная обработка. Активация соединения при этих способах осуществляется только за счет приложенного давления.

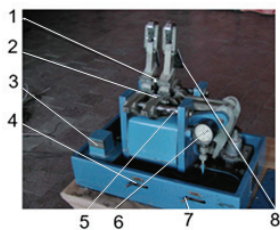
2.2.1. Холодная сварка

Холодная сварка (ХС) – способ соединения металлических деталей при комнатной температуре (иногда и отрицательной). Холодной сваркой соединяют металлы, имеющие высокую пластичность при комнатной температуре (Al, Au, Ag, Cu, Ni, Pb, Sn и др.) [6].

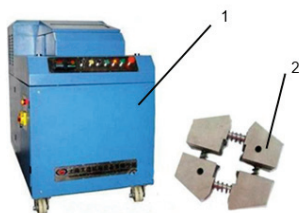
Для получения герметичных соединений без предъявления высоких требований к их механической прочности ХС может применяться при соединении меди с коваром и меди со сталью. В электромашиностроительной промышленности возникает необходимость в оконцевании выводов алюминиевых токопроводящих деталей медью. ХС удобно применять для соединения деталей, имеющих электрическую изоляцию, и для работы в огне и взрывоопасных помещениях. Примеры оборудования для промышленной холодной сварки даны на рис. 2.1 и 2.2.

Усилие в 120 тонн позволяет на подобных машинах выполнять сварку:

- с алюминиевым сечением (от 100 до 1500 мм кв);
- с медным типом сечения (от 100 до 1000 мм кв);
- с комбинированным медно-алюминиевым сечением (100 – 1000 мм кв).



а)



б)



в)



г)

Рис. 2.1. Примеры оборудования для промышленной холодной стыковой сварки: а – общий вид машины МСХС-5-3 со снятой крышкой: 1 – зажимной механизм неподвижный; 2 – свариваемые детали; 3 – отрезное устройство; 5 – кран управления отрезным устройством; 6 – манометр; 7 – кран управления приводом перемещения подвижного зажимного механизма; 8 – зажимной механизм подвижный; б – общий вид машины серии МСХС: 1 – машина; 2 – пуансон; в – общий вид машины серии МСХС; г – зажимной механизм



а)

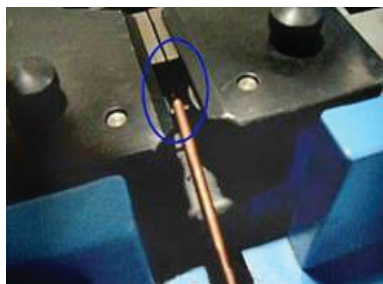


б)

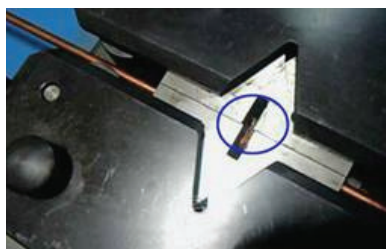
Рис. 2.2. Установки холодной сварки Trex - YouTube:
а – шовная сварка; б – точечная сварка



1)



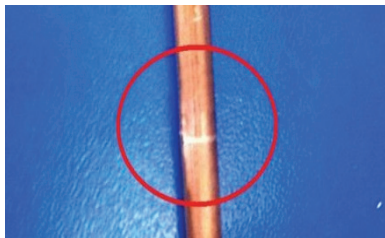
2)



3)



4)



5)

Рис. 2.3. Последовательность работы на машине для холодной стыковой сварки: 1 – включить установку; 2 – вставить проволоку или пруток в пуансон; 3 – с помощью блока управления произвести сжатие проволоки; 4 – извлечь сваренную проволоку; 5 – удалить облой, образовавшийся в процессе холодной сварки

Для соединения деталей ХС применяют различные схемы приложения давления P и схемы соединения: точечной сваркой при одностороннем и двухстороннем деформировании с предварительным и окончательным деформированием и шовной сваркой (рис. 2.3).

Точечной сваркой соединяют детали внахлестку без предварительного или с предварительным сжатием свариваемых деталей (рис. 2.4, 2.5). Точечная сварка без предварительного сжатия деталей может выполняться путем их двустороннего (рис. 2.4, а) или одностороннего сжатия (рис. 2.4, б).

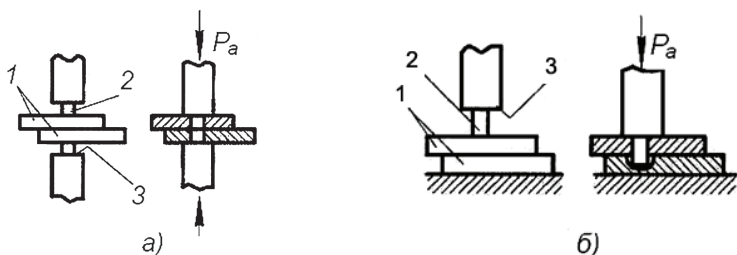


Рис. 2.4. Схема точечной сварки без предварительного сжатия при двустороннем (а) и одностороннем (б) деформировании: P_{oc} -усилие

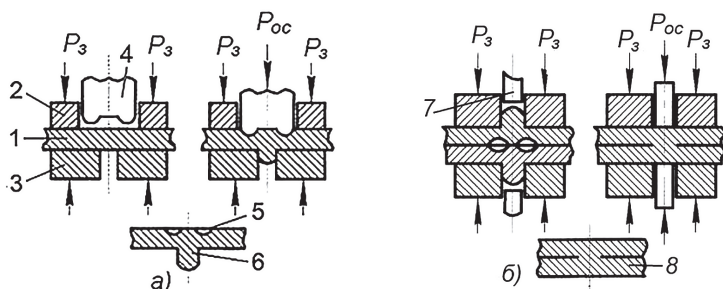


Рис. 2.5. Схема точечной сварки с предварительным (а) и окончательным (б) деформированием

Пуансон имеет выступ (2) и опорную часть (3) большого сечения (см. рис. 2.4). Под действием усилия (P_{oc}) рабочий выступ внедряется полностью в деталь (1), где и образуется сварная точка. Усилие передается деталям не только через рабочие выступы, но и через опорные части.

На рис. 2.6 показаны возможные формы свариваемых точек.



Рис. 2.6. Возможные формы сварных точек

Площадь сварной точки, как правило, равна площади сечения вдавливаемой части пуансонов, но при определенных условиях может ее превышать. Машина для холодной точечной сварки показана на рис. 2.7.

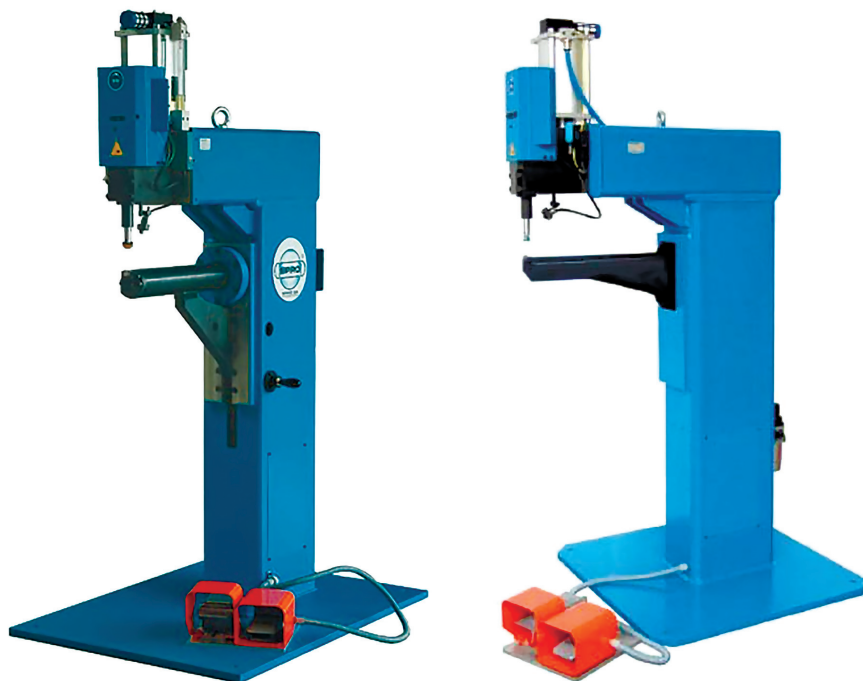


Рис. 2.7. Машины для холодной точечной сварки

К технологическим параметрам точечной сварки следует относить также количество и расположение сварных точек.

Сварка с предварительным сжатием деталей позволяет избавиться от вмятин в металле при точечной сварке. Эта схема предполагает наличие двух переходов при сварке: подготовительной и собственно сварочной.

Вначале деталь 1 зажимают между двумя прижимами 2 и 3, имеющими отверстия (см. рис. 2.5, а). Отверстие в верхнем прижиме 2 предназначено для перемещения специального пуансона 4, а в нижнем – 3 для течения выдавливаемого металла, образующего выступ. При вдавливании пуансона 4 в деталь 1 на верхней ее поверхности образуется углубление 5, в нижней части – выступ 6.

Оглавление

Предисловие	3
Глава 1. ОСНОВНЫЕ ДАННЫЕ ФИЗИКИ ТВЁРДОГО ТЕЛА О СТРОЕНИИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	4
1.1. Виды элементарных связей в твердых телах и монокристаллических соединениях	4
1.2. Кристаллическая решетка металлов	8
<i>Контрольные вопросы</i>	10
Глава 2. ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ СХЕМЫ МЕТОДОВ СВАРКИ ДАВЛЕНИЕМ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ	11
2.1. Методы сварки давлением. Основные и дополнительные технологические параметры	11
2.2. Р-Процессы	14
2.2.1. Холодная сварка	14
2.2.2. Сварка взрывом	28
2.2.3. Магнитно-импульсная сварка	43
2.2.4. Вакуумно-термическая магнитно-импульсная обработка	50
<i>Контрольные вопросы</i>	53
Глава 3. СВАРОЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ	54
3.1. Ударная сварка в вакууме	54
3.2. Сварка через электрически взрывающиеся прослойки в вакууме	57
3.3. Индукционная сварка металлов	61
<i>Контрольные вопросы</i>	72
Глава 4. СВАРКА В ТВЁРДОМ СОСТОЯНИИ	73
4.1. Ультразвуковая сварка	73
4.2. Сварка трением	83
<i>Контрольные вопросы</i>	90

Глава 5. ДИФФУЗИОННАЯ СВАРКА (Р, Т, А, f, t-ПРОЦЕССЫ)	91
5.1. Виды диффузионной сварки	91
5.2. Установки для диффузионной сварки	101
5.3. Источники нагрева	103
<i>Контрольные вопросы</i>	115
Глава 6. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ КОНТАКТНАЯ СВАРКА И ЕЕ РАЗНОВИДНОСТИ	116
<i>Контрольные вопросы</i>	124
Глава 7. ЭЛЕКТРОДУГОВАЯ СВАРКА ПЛАВЛЕНИЕМ	125
7.1. Процессы в электрической дуге	125
7.2. Способы зажигания дуги	140
7.3. Физико-технические основы дуговой сварки	144
7.4. Плавящиеся электроды для ручной дуговой сварки	153
7.5. Сварочные флюсы	167
7.6. Неплавающие электроды для сварки в защитных газах ...	175
<i>Контрольные вопросы</i>	178
Глава 8. ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ	179
8.1. Порядок выбора источника питания	179
8.2. Вольтамперные характеристики сварочных источников питания	180
8.3. Настройка режимов сварки	184
8.4. Настройка системы на заданный режим	188
8.5. Источники питания	190
8.6. Установки для сварки плавящимся электродом в за- щитных газах	201
8.7. Установки для импульсно-дуговой сварки серии S Speedpulse	206
8.8. Оборудование для автоматической сварки	208
8.8.1. Подвесные самоходные сварочные автоматы	208
8.8.2. Сварочные головки для дуговой сварки	210
8.8.3. Оборудование фирмы Kemppi (Финляндия)	214
<i>Контрольные вопросы</i>	216

Глава 9. СВАРКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ	217
9.1. Лазерная сварка	217
9.2. Электронно-лучевая сварка	225
9.3. Электронно-лучевая сварочная технологическая уста- новка	233
<i>Контрольные вопросы</i>	239
Глава 10. ГИБРИДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	240
<i>Контрольные вопросы</i>	248
Глава 11. СВАРКА ПЛАСТМАСС	249
11.1. Пластмассы и их свойства	249
11.2. Сущность процессов сварки пластмасс	254
11.3. Свариваемость термопластов	256
11.4. Оборудование для сварки полимерных материалов нагре- тым газом	258
11.5. Сварка пластмасс нагретым инструментом	267
11.5.1. Схемы процесса	267
11.5.2. Сварка прямым нагревом	268
11.5.3. Сварка оплавлением	270
11.5.4. Разновидности сварки прямым нагревом	274
11.5.5. Сварка косвенным нагревом	276
11.5.6. Кинетика процесса проплавления	279
11.6. Сварка прямым нагревом при монтаже трубопроводов	280
11.6.1. Сварка труб встык	281
11.6.2. Сварка труб в раструб	284
11.6.3. Сварка трубопроводов муфтами с закладными наг- ревателями	287
11.7. Оборудование для сварки труб	289
11.7.1. Оборудование для сварки встык	289
11.7.2. Оборудование для сварки труб в раструб и муфтами с закладным нагревателем	293
11.8. Индукционная сварка пластмасс	297
<i>Контрольные вопросы</i>	300
Литература	301