

Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана



Инновационная образовательная программа

«Научное и кадровое обеспечение инновационного развития технических систем, объектов и технологий, отвечающих требованиям мирового уровня к качеству, надежности и безопасности»

Теория сварочных процессов

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана

УДК 621.791.01(075.8)
ББК 34.641
Т338

Рецензенты:

кафедра «Оборудование и технология сварочного производства» Московского государственного индустриального университета (зав. кафедрой д-р техн. наук, проф. В.И. Ластовирия); д-р техн. наук, проф. кафедры «Технология сварки, материаловедение, износостойкость деталей машин» Московского государственного университета путей сообщения С.Н. Киселев

Теория сварочных процессов: Учебник для вузов / Т338 А.В. Коновалов, А.С. Куркин, Э.Л. Макаров, В.М. Неровный, Б.Ф. Якушин; Под ред. В.М. Неровного. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 752 с.: ил.

ISBN 978-5-7038-3020-8

Изложены теоретические основы сварочных процессов. Представлены сведения об основах физики сварочных дугowych источников энергии, особенностях использования для сварки лучевой энергии и источников энергии, применяемых для сварки давлением. Рассмотрены тепловые процессы при сварке металлов и даны основные сведения по химической термодинамике, физической химии, необходимые для понимания металлургических процессов при сварке. Описаны основные термомодеформационные процессы и превращения в металлах при сварке. Приведены краткие сведения о методах компьютерного моделирования сварочных процессов.

Содержание учебника соответствует курсам лекций, которые авторы читают в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов и магистров высших технических учебных заведений машиностроительных специальностей. Будет полезен инженерно-техническим работникам сварочного производства.

УДК 621.791.01(075.8)
ББК 34.641

ISBN 978-5-7038-3020-8

© Коллектив авторов, 2007
© Оформление. Издательство
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007

ПРЕДИСЛОВИЕ

В начале третьего тысячелетия сварка продолжает оставаться одним из ведущих технологических процессов создания материальной основы современной цивилизации. Более половины валового национального продукта промышленно развитых стран создается с помощью сварки и родственных технологий. До 2/3 мирового потребления стального проката идет на производство сварных конструкций и сооружений. Во многих случаях сварка является наиболее эффективным или единственно возможным способом создания неразъемных соединений конструкционных материалов и получения ресурсосберегающих заготовок, максимально приближенных по геометрии к оптимальной форме готовой детали или конструкции.

Сварке подвергаются практически любые металлы и неметаллы (пластмассы, керамика, стекло и др.). Разработка новых технологических процессов, сварочных материалов и процессов термической обработки сварных соединений требует основательной теоретической подготовки в области сварочных процессов. В связи с этим в Стандарте учебной программы по специальности 150202 «Оборудование и технология сварочного производства» дисциплина «Теория сварочных процессов» является базовой при подготовке инженеров-механиков. Она охватывает широкий круг процессов, происходящих при сварке материалов и определяющих в конечном итоге качество и работоспособность сварных соединений.

Учебник написан коллективом авторов – сотрудников кафедры «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана и включает в себя четыре раздела:

I. «Источники энергии для сварки» (д-р техн. наук, проф. В.М. Неровный);

II. «Тепловые процессы при сварке» (д-р техн. наук, проф. А.В. Коновалов);

III. «Физико-химические и металлургические процессы при сварке» (д-р техн. наук, проф. Б.Ф. Якушин);

IV. «Термодеформационные процессы и превращения в металлах при сварке» (д-р техн. наук, проф. А.С. Куркин, д-р техн. наук, проф. Э.Л. Макаров, д-р техн. наук, проф. А.В. Коновалов).

При описании процессов, сопутствующих образованию сварных соединений, используется широкий круг вопросов из различных фундаментальных дисциплин. Поэтому при подготовке учебника авторы придерживались учебного плана по данной специальности, согласно которому

студенты уже получили подготовку в области общенаучных и общетехнических дисциплин, включая высшую математику, физику, химию, сопротивление материалов, материаловедение, термодинамику, электротехнику и др.

Основой данного издания послужил учебник В.Н. Волченко, В.М. Ямпольского, В.А. Винокурова и других под редакцией В.В. Фролова «Теория сварочных процессов» (М., 1988), существенно дополненный и переработанный. Естественно, что в нем нашли отражение главные вопросы теории сварочных процессов, которые разрабатывались как российскими учеными, так и учеными других стран.

Учебник подготовлен в рамках реализации приоритетного национального проекта «Образование». Он может быть полезен также студентам специальностей 150107 «Металлургия сварочного производства», 150206 «Машины и технология высокоэффективных процессов обработки материалов», 150207 «Реновация средств и объектов материального производства в машиностроении», бакалаврам и магистрам направления 551800 «Технологические машины и оборудование», инженерно-техническим работникам сварочного производства.

Авторы выражают глубокую благодарность рецензентам, давшим ценные указания по материалу книги.

Все замечания и пожелания читателей, направленные на улучшение книги, будут восприняты авторами с благодарностью и пониманием.

ОТ АВТОРОВ

Конечная цель сварочного производства – выпуск экономичных сварных конструкций, отвечающих по своим конструктивным формам, механическим и физическим свойствам тому назначению и тем условиям эксплуатации, для которых они создаются. Обеспечение рациональных форм и определение оптимальных сечений элементов конструкций относится к задачам проектирования. Получение необходимых механических и физических свойств сварных соединений – главная задача, решение которой должны обеспечить технологические процессы сварки. Теория сварочных процессов призвана дать правильное описание совокупности явлений, которые составляют сущность сварки.

Сварка является весьма сложным процессом, в особенности если иметь в виду многообразие способов сварки, основанных на использовании различных физических явлений.

Первую группу явлений, которую рассматривает теория сварочных процессов, составляют физические, механические и химические явления, происходящие при подготовке свариваемого материала к образованию прочных связей между отдельными частями свариваемой детали. В большинстве случаев это явления, связанные с преобразованием различных видов энергии в тепловую. Металл, будучи нагрет и расплавлен, способен образовывать сварное соединение. Чаще всего при сварке для нагрева металла используют электрическую энергию. Однако существует много способов сварки, в которых используют энергию, выделяющуюся при горении газов, лучевую энергию, механическую, а также их сочетание. Физико-химические процессы, лежащие в основе этих способов, описаны в разд. I «Источники энергии для сварки».

Теплота, переданная источниками энергии свариваемому телу, распространяется в нем, подчиняясь законам теплопроводности. Эти явления рассмотрены в разд. II «Тепловые процессы при сварке». Если бы металл не изменял своих механических и физических свойств при повышении температуры, то задача изучения нагрева тел при сварке свелась бы только к определению условий, при которых металл в зоне сварки достигает необходимой температуры. В действительности изучение температурных процессов в металле шва и вблизи него необходимо главным образом по двум причинам: для количественного описания многочисленных реакций, которые идут между жидким металлом и шлаком или газом и для определения условий кристаллизации металла, различных структурных превращений и термомодеформационных процессов в метал-

лах. В разд. III и IV учебника рассмотрены металлургия и металловедение сварки.

Закономерности формирования химического состава металла шва изложены в разд. III «Физико-химические и металлургические процессы при сварке». В разд. I и II описаны те физические и температурные условия, которые создаются над поверхностью металла и в самом металле при сварке. В этом плане материал разд. I и II представляет собой как бы описание того физического фона, от которого зависит протекание реакций, переход различных легирующих элементов в металл шва или их удаление и окисление. Вопросы защиты металла шва и массообмена на границе металл – шлак и металл – газ являются центральными в разд. III. Эти процессы определяют химический состав металла шва, а следовательно, во многом и его механические свойства. Однако формирование свойств сварного шва, а тем более сварного соединения, определяется не только химическим составом металла. Характер кристаллизации шва во многом влияет на его свойства. Свойства околошовной зоны и в определенной мере металла шва существенно зависят от температурного и термомеханического циклов сварки. Для многих легированных сталей и сплавов эта фаза формирования сварного соединения предопределяет их механические свойства. Сварочные процессы вследствие передачи теплоты по механизму теплопроводности могут создавать такие скорости нагрева и охлаждения металла, которые часто невозможно организовать при термической обработке путем поверхностной теплопередачи. Образование сварного соединения сопровождается пластическими деформациями металла и возникновением собственных напряжений, которые также влияют на свойства соединений. Эти вопросы рассматриваются в разд. IV учебника – «Термодеформационные процессы и превращения в металлах при сварке».

Таким образом, теория сварочных процессов – теоретический фундамент науки о сварке в части формирования свойств сварного соединения. Разумеется, этим далеко не исчерпывается круг проблем, которые рассматриваются в области сварки. Теория сварочных процессов – один из первых курсов, который закладывает необходимую теоретическую базу для изучения различных технологических процессов, создания сварочных материалов, а также для понимания и объяснения ряда вопросов в области прочности сварных соединений. Наиболее близко теория сварочных процессов соприкасается с курсами, в которых изучаются различные технологические процессы. Это, однако, не означает, что все вопросы, необходимые для изучения технологии сварки, сосредоточены в теории сварочных процессов. Исторически сложилось некоторое условное разделение материала между этими двумя группами курсов. В теории сварочных процессов рассматриваются, как правило, те явления и процессы, которые свойственны многим видам сварки, как бы общие для них, в то время как в технологических курсах по сварке плавлением и давлением больше внимания уделено тем конкретным вопросам, которые в значительной мере зависят от изучаемых технологических приемов.

Раздел I

ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ ДЛЯ СВАРКИ

Глава 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И КЛАССИФИКАЦИЯ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ

1.1. Виды элементарных связей в твердых телах и монолитных соединениях

Монолитность сварных соединений. В технике широко используют различные виды разъемных и неразъемных соединений. Неразъемные соединения, в свою очередь, могут быть монолитными, т. е. сплошными, и немонолитными (например, заклепочные соединения). Монолитные соединения получают сваркой, пайкой или склеиванием.

Сварку и пайку используют для соединения между собой твердых тел: металлов и неметаллов. Монолитность сварных соединений обеспечивается появлением атомно-молекулярных связей между частицами соединяемых твердых тел.

Твердое тело представляет собой комплекс атомов, находящихся во взаимодействии. Физико-химические и прочностные свойства твердого тела зависят от типа связи между атомами и характера их взаимного расположения, поэтому прежде чем рассматривать природу сварного соединения, следует вспомнить некоторые сведения из физики твердого тела.

Элементарные связи в твердых телах. Характер и значение энергии элементарных связей в твердых телах зависят от природы вещества и типа кристаллической решетки твердого тела.

Наличие ряда кристаллических структур, разнообразие физических свойств (сжимаемость, точка плавления, электрические, оптические свойства и др.), а также различные химические свойства указывают на существование разных типов связи атомов в твердых телах. Силы межатомного взаимодействия имеют электрическое происхождение.

В первом приближении можно считать, что в образовании межатомных (химических) связей принимают участие в основном электроны валентных оболочек. Их вклад в энергию образования тела из атомов намного больше, чем вклад внутренних электронов. Химические связи по своей природе электромагнитные и действуют на расстояниях порядка 10^{-10} м.

Принято считать, что между частицами твердого тела кроме электромагнитного взаимодействия существуют взаимодействия еще трех типов: ядерные, или сильные, действующие на расстояниях менее 10^{-15} м (следовательно, на расстоянии 0,1 нм их можно не учитывать); слабые, обуславливающие β -распад (они слабее электромагнитных в 10^6 раз); гравитационные, которые в 10^{36} раз слабее электромагнитных.

Понятие химической связи относится к взаимодействию атомов с энергией $\sim 10 \dots 100$ кДж. Столь широкий интервал энергий может быть реализован различными взаимодействиями, которые традиционно классифицируют как типы химической связи: ковалентная, ионная, металлическая и водородная. Эта классификация не является четко определенной. Ковалентная связь представляет собой универсальный тип химической связи. Ионную связь можно рассматривать как частный (предельный) случай ковалентной связи между атомами, резко отличающимися друг от друга по своей электроотрицательности. Понятия металлической и водородной связей отражают скорее специфику химических объектов, нежели действующих сил. Наиболее типичны ковалентная и ионная химические связи.

Ковалентная связь означает химическую связь между атомами, осуществляемую общими электронами. Она может образоваться взаимодействием или спариванием валентных электронов. Если атомы одинаковы, например в молекулах водорода H_2 , щелочных металлов в газообразном состоянии Li_2 , K_2 , Na_2 , галогенов Cl_2 , Br_2 , азота N_2 , – то связь неполярная, при взаимодействии разных атомов, например $HC1$, – связь полярная. В предельном случае, когда электроны связи полностью смещены к одному из ядер, имеет место ионная связь. В природе сравнительно немного тел с ковалентными связями. Однако они имеют большое практическое значение благодаря высокой температуре плавления и твердости (например, алмаз C , кремний Si , германий Ge и карбид кремния SiC – карборунд). Главной чертой ковалентных связей является наличие обобщенных электронов и четкая пространственная ориентация.

При изучении сварочных процессов важно иметь в виду, что прочные ковалентные связи устанавливаются не только в кристаллах металлов, 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.

Ионная, или гетерополярная связь, типична для молекул и кристаллов, образованных из разных ионов (анионов и катионов). Типичным представителем ионных кристаллов является поваренная соль NaCl. Образование катиона – это результат потери атомом электрона. Мерой прочности связи электрона в атоме может служить потенциал ионизации атома. Образование анионов происходит в результате присоединения электрона к атому. Мерой способности к такому присоединению служит так называемое сродство к электрону. Особенностью ионной связи является отсутствие насыщенности и пространственной направленности. В природе очень много тел, имеющих ионные связи. Однако они имеют незначительное применение в машиностроении, потому что у них нет свойств, позволяющих использовать их как конструкционный материал.

Представления о чисто ковалентной и чисто ионной связи в значительной степени идеализированы. Обычно встречаются промежуточные случаи. Если при ионной связи один атом отдает электрон другому, а при ковалентной – каждый электрон принадлежит в равной степени обоим связанным атомам, то в промежуточных случаях возможны связи с любым «процентом ионности».

Водородная связь, называемая также протонной связью, представляет собой связь специфического типа, которая может быть как внутримолекулярной связью, так и межмолекулярной. Возникновение связей такого типа индуцируется ядром водорода (или протоном), которое благодаря своему малому размеру, может проникать в глубь электронной оболочки, обладающей сильной электроотрицательностью. Водородная связь занимает промежуточное положение между атомной и ионной связями и часто встречается в органических и некоторых неорганических соединениях. Ассоциации молекул воды, спирта, кислот и др. определяются водородными связями.

Металлические связи характерны для металлов. Металлическое тело можно считать одной макромолекулой, потому что металлические связи имеют место не только между двумя или несколькими атомами металла. Высокие значения тепло- и электропроводности металлов непосредственно связаны с их атомной структурой. Атомы металлов имеют мало электронов во внешней оболочке, и эти электроны сравнительно слабо связаны с остальной частью атома («остовом» атома). Слабая связь внешних электронов приводит к тому, что металлы имеют небольшие потенциалы ионизации. Металлическая связь ненаправленная, так как каждый атом стремится притянуть к себе как можно больше

соседних атомов. Следствием этого является большая компактность кристаллических структур металлов. Энергия металлической связи несколько меньше, чем энергия ковалентной связи, поэтому большинство металлов по сравнению с ковалентными кристаллами имеют более низкие модуль упругости, температуры плавления и испарения, но более высокий температурный коэффициент линейного расширения.

Поскольку в металле существует как бы облако обобществленных электронов, металлическая связь допускает большее смещение атомов, чем другие типы связей. Этим обуславливается высокая пластичность металлических кристаллов по сравнению с ковалентными или ионными кристаллами.

Между молекулами имеется специфическое взаимодействие, вызываемое *межмолекулярными силами*, или силами Ван-дер-Ваальса. Механизм такой связи присущ всем твердым телам. Силы Ван-дер-Ваальса действуют между молекулами газообразных и жидких веществ, а также между молекулами в кристаллических решетках. Однако эта связь имеет существенное значение только при отсутствии других связей. Силы Ван-дер-Ваальса сильнее действуют в кристаллах и жидкостях, слабее в газах, потому что они тем больше, чем ближе друг к другу находятся молекулы.

Все описанные выше типы связей и межмолекулярных взаимодействий могут быть рассмотрены как силы сцепления, или когезионные силы, в результате действия которых из отдельных атомов и молекул образуются тела в разном агрегатном состоянии и с разными свойствами. Чем больше энергия связи, тем сильнее когезия в теле и тем труднее его измельчить, расплавить или привести в газообразное состояние (табл. 1.1).

Таблица 1.1. Энергия межмолекулярных взаимодействий и химических связей разного типа

Элементарные связи	Энергия, кДж/моль
Химическая связь:	
ковалентная	418 – 628
ионная и металлическая	210 – 418
водородная	20 – 33,5
Межмолекулярные взаимодействия:	
силы Ван-дер-Ваальса	4,2 – 8,4
дисперсионные	0,84 – 8,4
электростатические	До 8,4
индукционные	До 2,0

Все рассмотренные связи в кристаллах редко проявляются в чистом виде. Как правило, сочетания различных связей существуют одновременно. Следует также отметить, что поверхности твердых тел в атмосферных условиях обычно инертны, так как валентности их атомов насыщены связью с атомами окружающей среды. Примером такого насыщения может служить окисление веществ в атмосфере. На поверхности могут также протекать процессы типа физической адсорбции, обусловленные силами Ван-дер-Ваальса.

1.2. Физико-химические особенности получения сварных, паяных и клеевых соединений

1.2.1. Механизм образования монокристаллических соединений твердых тел

На первый взгляд кажется, что образование монокристаллического соединения двух одинаковых монокристаллов с идеально гладкими и чистыми поверхностями возможно при любой температуре и без ввода внешней энергии. Для этого достаточно сблизить их поверхности на расстояние, соизмеримое с параметрами кристаллической решетки (порядка долей нанометра). Тогда между сопряженными атомами возникнут связи, граница раздела Δ (рис. 1.1) исчезнет и произойдет сварка.

Такой процесс кажется вероятным и не противоречит второму началу термодинамики, так как свободная энергия системы при этом должна уменьшиться на количество энергии двух исчезнувших поверхностей раздела. В действительности даже в идеальном случае для соединения поверхностей требуется затрата энергии. Дело в том, что любому устойчивому состоянию системы соответствует определенный минимум энергии атома ω_0 . Каждый атом находится как бы в потенциальной яме и переход из одного устойчивого состояния в другое возможен только путем преодоления потенциального барьера (рис. 1.2).

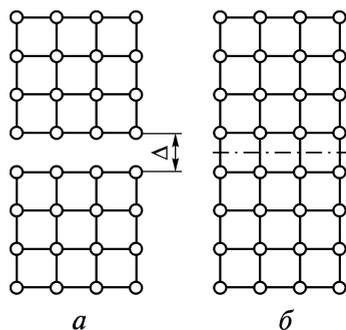


Рис. 1.1. Схема образования соединения двух монокристаллов с идеально чистыми и гладкими поверхностями: монокристаллы до (а) и после (б) соединения

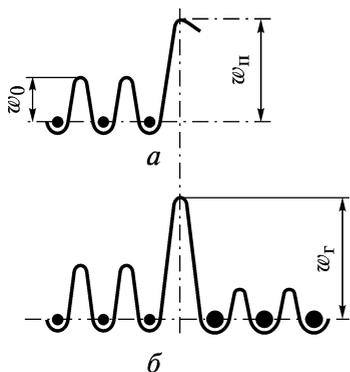


Рис. 1.2. Потенциальный барьер для системы атомов у поверхности кристалла (а) и на границе твердой и жидкой фаз (б) в начальный период их контакта

Внутри кристалла каждый атом удерживается симметрично направленными силами связи. На свободной поверхности кристалла или жидкости атом неуравновешен вследствие того, что со стороны окружающей среды связь отсутствует или заметно ослаблена. Это вызывает повышение энергии поверхностного слоя кристалла ω_{Π} . Если необходимая атому энергия, для перемещения внутри тела равна ω_0 (см. рис. 1.2), то для выхода в окружающую среду она равна ω_{Π} , причем $\omega_{\Pi} > \omega_0$. Поэтому для соединения двух монокристаллов в один требуется введение извне деформационной или тепловой энергии, превышающей граничную энергию ω_{Γ} .

Внешняя деформационная энергия будет затрачиваться на преодоление сил отталкивания, возникающих между сближаемыми поверхностными атомами. Когда расстояния между ними будут равны межатомному расстоянию в кристаллической решетке, возникнут квантовые процессы взаимодействия электронных оболочек атомов. После этого общая энергия системы начнет снижаться до уровня, соответствующего энергии атомов в решетке целого кристалла, и появится «выигрыш» энергии, равный избыточной энергии поверхностных атомов кристаллов до их соединения – энергии активации.

Тепловая энергия, сообщенная поверхностным атомам при повышении температуры, увеличивает вероятность развития квантовых процессов электронного взаимодействия в соединении.

Стадийность процесса сварки. Результаты исследований и теоретический анализ показывают, что сварку и пайку можно отнести к классу так называемых топохимических* реакций, которые отличаются двухстадийностью процесса образования прочных связей между атомами соединяемых веществ (рис. 1.3), характерной только для микроучастков соединяемых поверхностей.

* Топохимические реакции – это химические реакции с участием твердых тел.

На первой стадии (А) развивается физический контакт, т. е. осуществляется сближение соединяемых веществ на расстояния, требуемые для межатомного взаимодействия. При этом энергетические уровни связи соответствуют уровням, характерным для физической адсорбции ($w_{\text{п}} = 0,04 \dots 0,4$ кДж/моль). На второй стадии (Б) – стадии химического взаимодействия (схватывания) – заканчивается процесс образования прочного соединения. Схватывание – бездиффузионный процесс и в принципе может происходить при любых температурах, если возможна микропластическая деформация.

На практике получение монолитных соединений осложняется тем, что свариваемые поверхности имеют:

- микронеровности $\approx 10^{-6}$ м даже при тщательной обработке (поэтому при совмещении поверхностей контакт возможен лишь в отдельных точках);

- загрязнения, так как на любой поверхности твердого тела адсорбируются атомы внешней среды.

Для монолитного соединения материалов при сварке необходимо обеспечить контакт по большей части стыкуемых поверхностей и их активацию.

Энергия активации. Активация поверхности заключается в том, что поверхностным атомам твердого тела сообщается некоторая энергия, необходимая:

- для разрыва старых связей между атомами тела и атомами внешней среды, обусловленных физико-химическим состоянием поверхности;

- для повышения энергии поверхностных атомов до уровня потенциального барьера, при котором возможно образование новых химических связей, т. е. схватывание.

В общем случае энергия активации может быть сообщена в форме теплоты (термическая активация), упругопластической деформации (механическая активация), электронного, ионного и других видов облучения (радиационная активация).

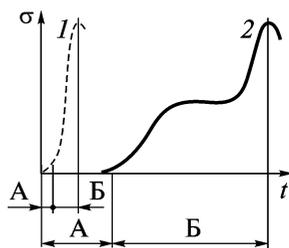


Рис. 1.3. Кинетика изменения прочности соединения σ в зависимости от длительности сварки t (топохимические кривые) при быстром (1) и медленном (2) развитии стадий образования физического контакта (А) и химического взаимодействия (Б)

1.2.2. Сварка плавлением и давлением

При *сварке плавлением* (и пайке) сближение атомов твердых тел осуществляется вследствие смачивания поверхностей твердых тел жидким металлом (припоем, расплавом), а активация поверхности твердого тела (металла) обеспечивается путем сообщения частицам поверхности тепловой энергии. Жидкий металл может растекаться по всей поверхности твердого тела, и при этом происходят соприкосновение и прилипание (или адгезия) его молекул и поверхностного слоя твердого тела.

При затвердевании расплавленного металла слабые адгезионные связи заменяются прочными химическими связями, соответствующими природе соединяемых материалов и типу их кристаллической решетки. При сварке плавлением вводимая энергия (обычно тепловая) должна обеспечивать расплавление основного и присадочного металлов, оплавление стыка, нагрев кромки и т. д. При этом происходит усиленная диффузия компонентов в расплавленном и твердом металле, их взаимное растворение. Эти процессы, а также кристаллизация расплавленного металла сварочной ванны (или припоя) обеспечивают объемное строение зоны сварки, что обычно повышает прочность сварного соединения.

Сварка плавлением происходит без приложения осадочного давления, т. е. осуществляется путем спонтанного слияния объемов жидкого металла, и обычно не требуется тщательной подготовки и зачистки соединяемых поверхностей. При сварке плавлением обе стадии процесса соединения – физический адгезионный контакт и химическое взаимодействие, сопровождаемое диффузией, – протекают достаточно быстро (см. рис. 1.3, кривая 1). Для однородных металлов это не опасно. Но в случае разнородных материалов с ограниченной взаимной растворимостью практически трудно получить соединения без хрупких интерметаллических прослоек в зоне контакта.

При быстром образовании физического контакта твердого тела с расплавом, например при сварке путем расплавления одного из соединяемых металлов, сначала на границе твердой и жидкой фаз будет наблюдаться пик межфазной энергии w_{Γ} , аналогичный w_{Π} (см. рис. 1.2), так как переход атомной системы в новое состояние происходит не мгновенно, а за некоторый конечный промежуток времени. Длительность так называемого периода ретардации (задержки) пика поверхности раздела может быть приближенно рассчитана как время жизни атома перед потенциальным барьером или определена экспериментально. На основании этих данных

можно определить допустимую длительность контакта твердой и жидкой фаз и оптимальную температуру сварки или пайки.

При *сварке давлением* (в твердой фазе) сближение атомов и активация поверхностей достигаются в результате совместного упругопластического деформирования соединяемых материалов в зоне контакта, часто одновременно с дополнительным нагревом. Длительность стадий (см. рис. 1.3) образования физического контакта (А) и химического взаимодействия (Б) при сварке давлением существенно больше, чем при сварке плавлением, и зависит от ряда факторов: физико-химических и механических свойств соединяемых материалов, состояния их поверхностей, состава внешней среды, температуры нагрева, схемы приложения давления или других средств активации (ультразвука, трения и т. д.).

В последнее время предложены методы приближенного расчета параметров режима сварки статическим давлением, которые подтверждаются экспериментально. Длительность процесса образования физического контакта, заключающегося в снятии микронеровностей, рассчитывают по скорости ползучести. Длительность второй стадии – химического взаимодействия – оценивают по уравнению Больцмана как длительность периода активации. Расчеты основаны на представлениях о схватывании материалов в результате ползучести на контактных поверхностях и образовании прочных химических связей в местах выхода и перемещения вакансий, дислокаций и скоплений. Выход дислокации на контактную поверхность активирует ее путем разрыва насыщенных связей, что приводит к образованию активных центров.

Вместе с тем процесс получения работоспособного соединения в большинстве случаев (особенно при наличии сопутствующего нагрева) не заканчивается схватыванием. Дальнейшее его развитие происходит в результате диффузионных перемещений атомов через границу контакта на стадии *объемного взаимодействия*, которой и завершается сварка. Ясно, что в случаях, когда сварка давлением осуществляется без внешнего нагрева (холодная сварка, сварка взрывом и др.), так называемая третья стадия (стадия объемного взаимодействия) не получает существенного развития и соединение завершается на стадии схватывания.

Относительная роль схватывания и объемного взаимодействия в разных методах соединения металлов различна и определяется в основном температурой, временем и давлением в зоне контакта. Например, при диффузионной сварке, как правило, объемное взаимодействие получает заметное развитие и соединение завершается образованием общих зерен в зоне контакта.

1.2.3. Пайка и склеивание

Пайкой называется образование соединения с межатомными связями в результате нагрева соединяемых металлов (ниже температуры их плавления), смачивания их расплавленным припоем, затекания припоя в зазор и последующей его кристаллизации. Сварку и пайку часто бывает трудно разграничить. Например, на пайку похожа сварка разнородных металлов в сочетаниях сталь и медь, вольфрам и молибден и др., когда расплавляется только один, более легкоплавкий металл. Поэтому в дальнейшем при анализе источников энергии целесообразно объединить сварку и пайку и называть рассматриваемые процессы одним термином – сварка. Пайку можно выполнить с использованием тех же источников энергии, что и сварку.

Образование непрерывной межатомной связи при пайке происходит в процессе смачивания припоем поверхности соединяемых деталей. Смачивание и связь твердого тела с жидкостью обусловлены электростатическими силами Ван-дер-Ваальса и силами химического взаимодействия.

Адгезию и когезию между твердым и жидким веществами обычно принято называть смачиванием. Различают три типа смачивания: 1) физическое (или обратимое); 2) хемоадсорбционное; 3) химическое смачивание, при котором имеет место растворение одного вещества в другом, взаимное растворение или химическая реакция. Для осуществления химического смачивания при пайке необходим нагрев деталей и припоя, а также активация в специальных средах при обработке поверхности флюсом.

Склеивание может происходить практически без введения энергии в месте соединения благодаря силам адгезии (прилипания) между жидким клеем и молекулами поверхностных слоев твердого тела, а также в результате химических реакций. Способность клея соединять изделия объясняется силами остаточного химического сродства между находящимися на поверхности молекулами клея и склеиваемого материала. Эти силы примерно в 10–100 раз меньше основных сил химической связи в простых молекулах. Они, например, обуславливают у жидкостей явление поверхностного натяжения, способность смачивать или не смачивать поверхности различных материалов.

В случае высокомолекулярных соединений, когда мономерная молекула, повторяясь в полимере тысячи раз, образует макромолекулу, силы адгезии возрастают прямо пропорционально росту молекулярной массы. Эти силы, имея электрическую природу, в значительной степени зависят от химической структуры клея и склеиваемого материала.

Полярные группы – карбоксильные, спиртовые, эпоксидные, аминогруппы и другие – значительно увеличивают адгезию клея к полярным материалам. Для увеличения адгезионных сил при склеивании некоторые неполярные материалы подвергают термической или химической обработке с целью получения на их поверхности полярных групп. Наличие или отсутствие адгезии клея к склеиваемому материалу легко определить по смачиваемости клеем этого материала. Для улучшения адгезии во всех случаях склеиваемую поверхность подвергают тщательной очистке и обезжириванию (иногда искусственно повышают степень ее шероховатости).

Однако прочность клеевого соединения определяется не только адгезией, но и когезией, т. е. силами взаимодействия между молекулами самого клея. Силы когезии термопластических клеев имеют ту же природу, что и силы адгезии. У клеев на основе терморезистивных связующих когезионные силы внутри клеевого шва после его отвердевания будут усиливаться также благодаря образованию обычных химических связей.

Таким образом, прочность клеевых соединений определяется химическими и межмолекулярными силами притяжения частиц клея и склеиваемого материала. В начальной стадии процесса, когда силы взаимодействия, обусловленные смачиванием и межмолекулярным взаимодействием частиц, в основном слабы, прочность клеевого соединения мала. Далее при возникновении химических связей прочность увеличивается.

Существенное отличие склеивания от большинства сварочных процессов и пайки заключается в том, что при затвердевании клея вследствие охлаждения, полимеризации и других физико-химических явлений взаимное растворение и диффузия соединяемых материалов, как правило, полностью отсутствуют.

1.3. Термодинамика сварки и баланс энергии при сварке

1.3.1. Термодинамическое определение сварки

Анализ физико-химических особенностей получения сварных и паяных соединений позволяет установить наличие в зоне сварки двух основных физических явлений, связанных с необратимым изменением энергии и вещества (рис. 1.4): введение и преобразование энергии; движение (превращение) вещества.

Вид, интенсивность вводимой энергии и характер ее преобразования – вот главное, что определяет способ сварки. Введение энергии – всегда необходимое условие сварки, так как без этого невозможна активация соединяемых поверхностей; введение

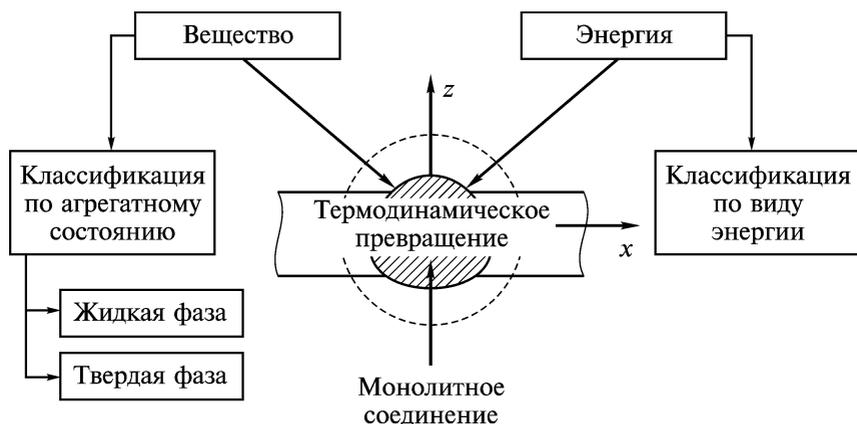


Рис. 1.4. Схема термодинамических превращений энергии и вещества при сварке

вещества необходимо только при некоторых видах сварки плавлением и пайки, причем энергия в этих случаях может быть введена также с расплавленным металлом.

Характер движения (переноса) вещества в зоне сварки сильно меняется от процесса к процессу. Движение значительно при сварке плавлением и пайке, особенно при наличии присадочного материала. При сварке давлением с нагревом металл в зоне стыка испытывает незначительные превращения и существенно только движение вещества через стык в результате диффузии. Холодная сварка реализуется практически без движения вещества, если не учитывать переползания дислокаций и выхода их на поверхность.

Исходя из сказанного, можно дать так называемое термодинамическое определение сварки: сварка – это процесс получения монокристаллического соединения материалов за счет термодинамического необратимого преобразования тепловой и механической энергии и вещества в месте соединения.

Склеивание, цементирование и другие соединительные процессы, обеспечивающие монолитность соединения, в отличие от сварки и пайки, как правило, не требуют специальных источников энергии. Они реализуются обычно только за счет введения (превращения) вещества: клея, цемента и т. д. (рис. 1.5).

Кроме самого общего, термодинамического, возможны и другие определения сварки. Например, в технологическом аспекте согласно ГОСТ 2601–84: сварка – это процесс получения неразъемных соединений посредством установления межатомных связей между свариваемыми частями при их местном нагреве или пласти-

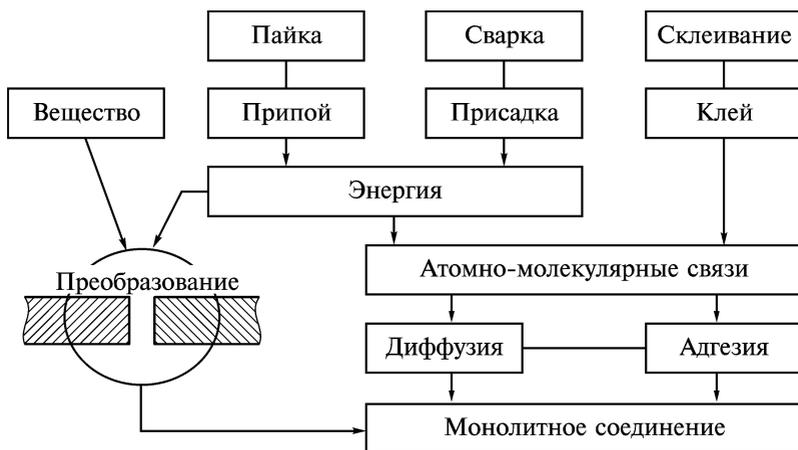


Рис. 1.5. Схема получения монолитного соединения при сварке, пайке и склеивании

ческом деформировании либо при совместном действии того и другого. Вместе с тем именно энергия и пути ее преобразования являются доминирующими факторами, которые определяют сварку как физико-химическое явление.

Рассмотрение термодинамической структуры сварочных процессов позволяет подразделить их по виду введенной энергии на термические, термомеханические и механические процессы.

На основании первого закона термодинамики можно подсчитать изменение внутренней энергии системы соединяемых элементов, теоретически необходимое для образования монолитного соединения при данных конкретных условиях, в которые входят источник энергии, материал изделий, конструкция соединения и т. д.

1.3.2. Типовой баланс энергии при сварке

Для количественной оценки процессов передачи и термодинамического преобразования энергии при разных видах сварки необходимо наметить обобщенную схему баланса энергии. В нее входят следующие основные ступени передачи энергии (рис. 1.6): сеть питания; источник энергии для сварки или преобразователь энергии ПЭ; носитель энергии – инструмент, передающий энергию от источника энергии к зоне сварки (резки или напыления); изделие – зона сварки (стык соединяемых деталей).

При изучении преобразования энергии в сварочных процессах удобно использовать удельную энергию ϵ , определяемую в расчете на единицу площади сварного соединения S (рис. 1.7).

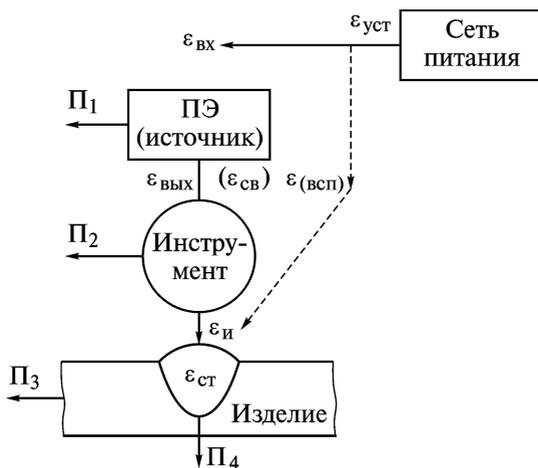


Рис. 1.6. Обобщенная схема баланса энергии сварочного процесса

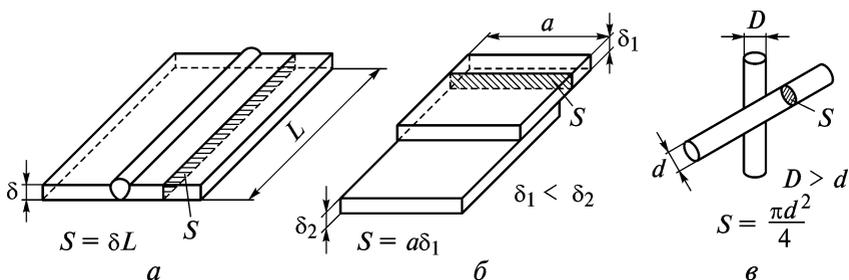


Рис. 1.7. Схема выбора рабочей площади S для расчета удельной энергии сварки стыковых (a), нахлесточных (b) и крестообразных (v) соединений

Обозначения удельной энергии на различных стадиях преобразования в схеме баланса энергии (см. рис. 1.6) приняты следующие:

$\epsilon_{\text{вх}}$ – энергия, получаемая сварочной установкой от сети питания; она может использоваться непосредственно на сварку ($\epsilon_{\text{св}}$) и вспомогательные операции ($\epsilon_{\text{всп}}$);

П_1 – потери энергии в сварочном источнике, с их учетом энергия $\epsilon_{\text{св}}$ составит: $\epsilon_{\text{св}} = \epsilon_{\text{вх}} - \text{П}_1$;

П_2 – потери в инструменте при передаче энергии изделию; $\epsilon_{\text{и}}$ – энергия, введенная в изделие: $\epsilon_{\text{и}} = \epsilon_{\text{св}} - \text{П}_2$;

П₃ – потери энергии в изделии на теплопроводность;

П₄ – потери уноса (с испарившимся или выплавленным материалом);

$\varepsilon_{\text{СТ}}$ – энергия, аккумулированная в зоне стыка: $\varepsilon_{\text{СТ}} = \varepsilon_{\text{И}} - (\text{П}_3 + \text{П}_4)$.

Потери уноса характерны главным образом для резки, но могут возникать и при высокоинтенсивных процессах лучевой сварки.

Отдельные ступени передачи энергии в схеме ее баланса в зависимости от вида сварочного процесса могут существенно изменяться и даже отсутствовать совсем. Например, носитель энергии (инструмент) в термических процессах – это луч, дуга или пламя, а при контактной сварке – сам нагретый металл в зоне контакта.

1.3.3. КПД сварочных процессов

Каждая ступень передачи энергии от источника к изделию может иметь свой коэффициент полезного действия (КПД). Из теории распространения теплоты при сварке известны эффективный ($\eta_{\text{И}}$) и термический ($\eta_{\text{Т}}$) КПД сварочного процесса, которые принято выражать так:

$$\eta_{\text{И}} = \varepsilon_{\text{И}} / \varepsilon_{\text{СВ}}; \quad \eta_{\text{Т}} = \varepsilon_{\text{СТ}} / \varepsilon_{\text{И}}.$$

Кроме того, по мере накопления данных по анализу энергетического баланса для всех сварочных процессов в дальнейшем целесообразно ввести термодинамический КПД сварочного процесса $\eta_{\text{ТД}} = \varepsilon_{\text{СТ}} / \varepsilon_{\text{СВ}} = \eta_{\text{И}} \eta_{\text{Т}}$, который по форме аналогичен КПД процесса проплавления (например, при дуговой сварке листов), однако имеет более общий характер. Термодинамический КПД сварочного процесса показывает отношение минимальной удельной энергии $\varepsilon_{\text{СТ}}$, необходимой в зоне сварки для выполнения данного соединения, к требуемой энергии сварочного источника, передаваемой инструменту. Удельная энергия $\varepsilon_{\text{СТ}}$ соответствует в данном случае изменению энергосодержания зоны стыка, отнесенному к площади получаемого сварного соединения.

Представляет интерес сравнение введенной в изделие удельной энергии $\varepsilon_{\text{И}}$ и удельной энергии $\varepsilon_{\text{Р}}$, необходимой для разрушения полученного сварного соединения. Их отношение будет приближенно характеризовать некоторый физический КПД процесса соединения материалов: $\eta_{\text{Ф}} = \varepsilon_{\text{Р}} / \varepsilon_{\text{И}}$.

В связи с изложенным целесообразно сравнивать по вводимой энергии все существующие сварочные процессы. Этот критерий поможет выявить общие физические закономерности, связывающие их между собой.

1.4. Классификация сварочных процессов

1.4.1. Признаки классификации сварочных процессов

При классификации сварочных процессов целесообразно выделить три основных физических признака: наличие давления, вид вводимой энергии и вид инструмента – носителя энергии. Остальные признаки можно условно отнести к техническим или технологическим (табл. 1.2). Такая классификация использована в ГОСТ 19521–74. Признак классификации по наличию давления применим только к сварке и пайке. По виду вводимой в изделие энергии все сварочные процессы, включая сварку, пайку, резку и др., могут быть разделены на термические, термомеханические и механические. Термические процессы идут без давления (сварка плавлением), остальные – обычно с давлением (сварка давлением).

Таблица 1.2. Признаки и ступени классификации сварочных процессов

Наименование признаков	Содержание признаков	Ступени классификации и порядок расположения процессов
Физические	Наличие давления при сварке	Класс
	Вид энергии, вводимой при сварке	Подкласс
	Вид нагрева или механического воздействия (вид инструмента)	Метод
Технические	Устанавливаются для каждого метода отдельно	Группа Подгруппа Вид Разновидность
Технологические	То же	Способ Прием
Технико-экономические	Удельная энергия, необходимая для получения соединения, удельные затраты и т. п.	Устанавливается порядок в расположении методов сварки от механических к термическим процессам по увеличению ϵ

Термины «класс», «метод», «вид», «способ» условны, но будут использованы в классификации, они позволяют в дальнейшем ввести четкую систему типизации сварочных процессов. Термин «процесс» используют как независимый от классификационных групп.

Классификация методов сварки по физическим признакам приведена в табл. 1.3. Физические признаки – общие для всех методов сварки. Технические признаки могут быть определены только для отдельных методов сварки.

Анализ энергетического баланса показывает, что все известные в настоящее время методы сварки металлов осуществляются введением энергии двух видов – термической и механической или их сочетания. Нейтронная сварка пластмасс и (условно) склеивание, которые практически происходят без введения энергии, могут быть включены в группу особых сварочных процессов. Сварка вакуумным схватыванием (не в отдельных точках, а по всему стыку) возможна только при наличии сдавливания, поэтому она отнесена к механическим процессам, хотя в этом случае может происходить выделение энергии, а не ее ввод извне.

Таблица 1.3. Классификация методов сварки металлов по физическим признакам

Класс сварки	Методы сварки	
Сварка плавлением (термический процесс)	Дуговая* Электрошлаковая* Электронно-лучевая Плазменно-лучевая Ионно-лучевая Глеющим разрядом	Световая* Индукционная Газовая Термитная Литейная
Сварка давлением: термомеханический процесс	Контактная* Диффузионная* Индукционно-прессовая Газопрессовая Термокомпрессионная	Дугопрессовая Шлакопрессовая Термитно-прессовая Печная
механический процесс	Холодная Взрывом Ультразвуковая	Трением Магнитоимпульсная Вакуумным схватыванием**
*Рекомендуется дополнительная классификация по техническим и технологическим признакам.		
**Промышленного применения метод не нашел.		

Таблица 1.4. Типовые структурные схемы преобразования энергии в сварочных процессах (потери энергии не указаны)

Термические процессы	Термомеханические процессы	Механические процессы
<p>Лазерная сварка</p> <p>Электронно-лучевая сварка</p>	<p>Контактная точечная сварка</p>	<p>Сварка взрывом</p> <p>Сварка трением: в – вращение, о – осадка</p>
<p>Дуговая сварка</p>	<p>Газопрессовая сварка</p> <p>Диффузионная сварка в вакууме</p>	<p>Ультразвуковая сварка</p> <p>Холодная сварка</p>

Примечание. Виды энергии: Д – деформационная; М – механическая; ПЭ – энергия направленного потока электронов; Т – тепловая; ЭЛ – электрическая; ЭМ – электромагнитная; Х – химическая; ΔС – энергия, выделенная в зоне стыка.

Сложившийся годами термин «сварка давлением» не совсем точен, так как давление в этих процессах – не единственное внешнее воздействие. Однако он общепотребителен. Давление необходимо всегда, если при сварке отсутствует ванна расплавленного металла и сближение атомов (активация стыкуемых поверхностей) достигается вследствие упругопластического деформирования материала поверхностей. Следует отметить, что и при наличии давления может происходить расплавление металла, например, при термитной сварке с давлением, контактной точечной и шовной сварке с образованием литого ядра, стыковой сварке оплавлением, сварке трением и др.

Весьма желательно, чтобы принцип классификации процессов сварки определялся какими-либо количественными технико-экономическими признаками. Такими признаками могут быть: значения удельных энергий (сварочной $\epsilon_{\text{св}}$ или введенной в изделие $\epsilon_{\text{и}}$); удельные организационно-экономические затраты на сварку.

Удельные показатели можно подсчитывать отдельно по каждой группе соединений, свариваемых материалов и т. д. Затраты следует относить к так называемой рабочей площади соединения S , которая в случае сварки встык соответствует продольному сечению шва без выпуклости. Для нахлесточных соединений площадь S соответствует сечению меньшего из соединяемых элементов (см. рис. 1.7). Для дуговой сварки в один проход материала толщиной δ при токе, напряжении и скорости сварки соответственно I , U , v удельная энергия равна

$$\epsilon_{\text{св}} = \frac{UI}{v\delta}.$$

Расчеты удельных энергий $\epsilon_{\text{св}}$ и $\epsilon_{\text{и}}$ показывают, что удельная энергоемкость процесса сварки единицы площади стыка имеет тенденцию к уменьшению при переходе от термических к механическим процессам (рис. 1.8). Удельная энергия $\epsilon_{\text{и}} = \epsilon_{\text{св}}\eta_{\text{и}}$ характеризует также количество переплавленного или разогретого материала на единицу площади сварного шва, а следовательно, и объем активной зоны сварного соединения, в которой произошли существенные изменения состояния материала, деформация соединения и т. д. Этот показатель может быть использован наряду с погонной энергией q/v , где q – эффективная мощность источника энергии для сварки.

Анализ типовых структурных схем передачи энергии при разных сварочных процессах (табл. 1.4) позволяет обосновать предлагаемую выше классификацию. Например, при дуговой сварке электрическая энергия ЭЛ из сети проходит следующий путь:

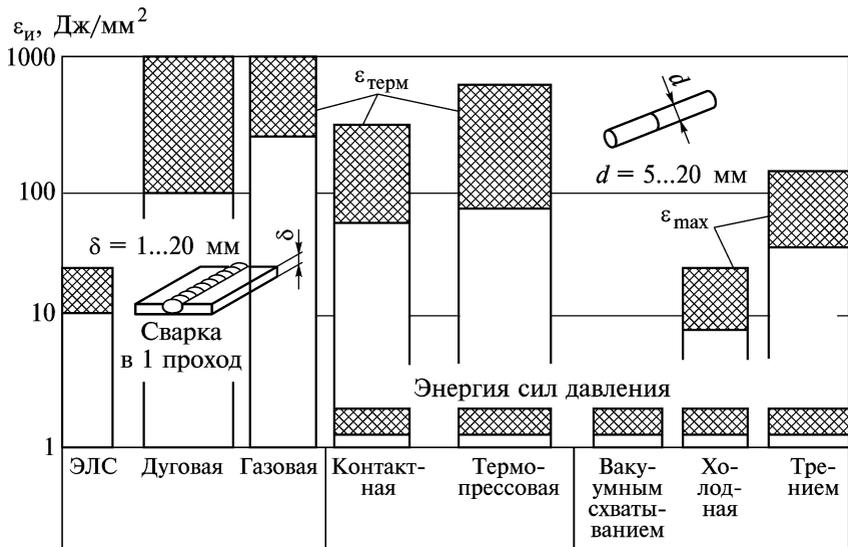


Рис. 1.8. Удельная энергия $\epsilon_{и}$, необходимая для выполнения одностипных стыковых соединений с применением разных сварочных процессов

- преобразуется в сварочном источнике питания для получения нужных параметров тока и напряжения дуги;
- преобразуется в дуговом разряде в другие виды энергии: термическую Т, электромагнитную ЭМ, электрическую ЭЛ;
- поступает в зону сварки в виде теплоты, изменяя внутреннюю энергию соединения, расходуясь на образование новых атомных связей, новых структур материала, деформацию и нагрев изделия, и т. д.

1.4.2. Термические процессы

Для всех термических сварочных процессов, независимо от вида носителя энергии (инструмента), она вводится в стык в конечном итоге всегда через расплавленный материал. Энергия хаотически движущихся частиц расплавленного материала носит в термодинамике название термической, чем и обосновано наименование этих процессов.

Теория термических процессов и их применение описаны в гл. 2 и 3 достаточно подробно. Из рассмотрения исключены химические процессы газовой и термитной сварки, индукционная и электрошлаковая сварка, которые изучаются в соответствующих технологических курсах.

1.4.3. Термомеханические процессы

К термомеханическим сварочным процессам относятся процессы, идущие с введением теплоты и механической энергии сил давления при осадке. Теплота может выделяться при протекании электрического тока, газопламенном или индукционном нагреве, при введении в зону сварки горячего инструмента и т. п. Сварка может вестись как с плавлением металла (частичным или по всему соединению), так и без плавления. Эти процессы подробно описаны в технологических курсах.

Сокращение затрат энергии (благодаря рациональному выбору источника энергии для сварки) даже на несколько процентов может дать в масштабах страны существенную экономию энергии, что в свете постоянно растущего дефицита энергии на Земле приобретает с каждым годом все большее значение.

Эффективность использования способов сварки плавлением достигается при минимальной ширине шва, что, в свою очередь, определяется степенью концентрации источника теплоты (диаметром пятна нагрева) и теплофизическими особенностями проплавления. Эти особенности учитываются при определении энергозатрат на сварку через термический КПД процесса, а полученные выше минимальные оценки полезной удельной энергии составляют лишь часть общей энергии сварки, т. е. $\epsilon_{ст} = \eta_{и}\eta_{т}\epsilon_{св}$. Учитывая эффективный и термический КПД сварочных процессов, можно изменить представление о целесообразности применения того или иного способа сварки при прочих равных условиях. Например, дуговая сварка с высокими значениями эффективного КПД ($\eta_{и} = 0,6...0,8$) характеризуется низкими значениями термического КПД ($\eta_{т} = 0,15...0,25$). Электронно-лучевая сварка, характеризуется более высокими значениями $\eta_{и}$ ($0,8...0,9$) и $\eta_{т}$ ($0,3...0,5$). В термодинамическом аспекте она более предпочтительна.

Сопоставим удельные энергозатраты на сварку листов низкоуглеродистой стали толщиной 10 мм различными способами (табл. 1.5). Минимальное энергосодержание расплавленной стали составляет около 9000 Дж/см^3 . Приведенные в табл. 1.5 оценки являются приближенными, так как даже для одного и того же процесса на разных режимах сварки энергозатраты могут различаться в 1,5–2 раза, что определяется параметрами режима и свариваемого сплава. Кроме того, КПД источника теплоты не является постоянным, ввиду его зависимости от скорости сварки, состояния поверхности и др.

Таблица 1.5. Характеристики эффективности некоторых способов сварки

Способ сварки	Средняя ширина шва, см	Минимальная удельная энергия стыка, кДж/см ²	КПД сварки		Минимальная удельная энергия сварки, кДж/см ²
			$\eta_{и}$	$\eta_{г}$	
Аргонодуговая	2,0	18,0	0,4–0,7	0,18–0,22	128,5
Плазменная	1,5	13,5	0,5–0,75	0,2–0,3	60,0
Электронно-лучевая	0,8	7,2	0,7–0,85	0,2–0,5	20,0
Лазерная	0,5	4,5	0,05–0,6	0,38–0,42	16,0

Для одного и того же источника энергии, например при контактной сварке, внутреннее сопротивление машины может различаться в 10 раз и соответственно этому изменяется КПД источника.

1.4.4. Требования к источникам энергии для сварки

Классификация сварочных процессов показывает, что каждая их группа может быть реализована с помощью определенного источника энергии. Для выполнения качественной сварки источник энергии должен отвечать требованиям технологической и конструктивной целесообразности применения, экономичности преобразования энергии, ограничения вредных побочных эффектов при сварке и т. п.

Источники энергии для сварки плавлением (луч, дуга, пламя и др.) должны обеспечивать в зоне сварки (пятне нагрева заданных размеров) концентрацию тепловой энергии и температуру, достаточную для плавления материала и провара его на требуемую глубину, но без интенсивного испарения.

Источники энергии для сварки давлением (контактной, термомпрессовой, холодной и др.) должны обеспечивать концентрацию тепловой или механической энергии в зоне сварки, а также давление, достаточное для создания физического контакта, активации соединяемых поверхностей и химического взаимодействия атомов в зоне контакта.

Должны быть также обеспечены физическая или физико-химическая защита зоны сварки от окружающего воздуха и другие технологические условия, специфические для каждого метода сварки.

1.4.5. Прессово-механические процессы

В основе всех прессово-механических процессов лежит пластическая деформация, создаваемая тем или иным способом в зоне сварного соединения.

Для пластичных материалов возможна деформация в холодном состоянии (холодная сварка). При увеличении сечений свариваемых деталей и повышении прочности свариваемого материала (стали) для уменьшения усилий деформирования и повышения пластичности материала его предварительно подогревают (кузнечная, диффузионная сварка). В ряде случаев нагрев свариваемых изделий осуществляется в результате преобразования первичной механической энергии в тепловую (сварка трением, ультразвуковая сварка).

Давление в прессово-механических сварочных процессах может осуществляться как при помощи мощных пневмогидравлических устройств, так и за счет энергии взрыва (сварка взрывом).

1.5. Требования к источникам энергии для сварки и оценка их эффективности

1.5.1. Оценка энергетической эффективности процессов сварки

При выборе источника энергии для сварки конкретных изделий следует учитывать техническую возможность применения данного источника, эффективность процесса (энергетическую и экономическую), а также качество и надежность получаемых изделий.

Концентрация энергии для источников термических процессов может оцениваться плотностью мощности в пятне нагрева. Наибольшую плотность мощности (до 10^8 Вт/мм² и выше) при пятне нагрева площадью до 10^{-6} мм² могут иметь лазерный и электронный лучи (табл. 1.6).

Таблица 1.6. Энергетические характеристики некоторых термических источников энергии для сварки и резки

Источники энергии	Температура пламени или дуги, К	Наименьшая площадь пятны нагрева, мм ²	Наибольшая плотность мощности в пятне, Вт/мм ²
Газовое пламя	2600–3500	1	$5 \cdot 10^2$
Топливо-плазменное пламя	4000–5000	1	$5 \cdot 10^2$

Источники энергии	Температура пламени или дуги, К	Наименьшая площадь нагрева, мм ²	Наибольшая плотность мощности в пятне, Вт/мм ²
Дуга в парах:			
щелочных металлов	4500–5000	1	$1 \cdot 10^3$
железа	5000–6000	1	$1 \cdot 10^3$
Дуга в газах:			
водород, азот	5000–8000	$1 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^3$
аргон, гелий	6000–10000	–	–
Микроплазменная дуга	10000–20000	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^5$
Электронный луч	–	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^7$
Лазерный луч	–	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^8$

Примечание. Понятие температуры для луча нехарактерно, так как в этом случае движение частиц в основном направленное, а не хаотичное.

Однако сварка возможна только до плотности мощности $10^3 \dots 10^4$ Вт/мм², так как большие плотности мощности приводят к выплескам и интенсивному испарению материала, полезному лишь при резке и размерной обработке изделий. Плотность мощности луча и энергетические коэффициенты наплавки, расплавления и другие (см. гл. 3) пригодны для оценки только отдельных видов источников энергии или методов сварки. Для оценки эффективности разных классов сварочных процессов и разных методов сварки и пайки целесообразно использовать удельные энергии $\epsilon_{св}$ и $\epsilon_{и}$, необходимые при сварке данного соединения.

1.5.2. Расчет энергоемкости процессов сварки

Расчеты показали, что для многих видов соединений и материалов механические и термомеханические процессы требуют значительно меньше энергии, чем термические процессы при сварке плавлением. Например, при сварке встык стальных стержней диаметром 20 мм дуговым ванным способом необходимая удельная энергия $\epsilon_{св} \approx 1800$ Дж/мм²; при контактной стыковой сварке опла-

лением $\epsilon_{\text{св}} \approx 400 \text{ Дж/мм}^2$; при сварке трением $\epsilon_{\text{св}} \approx 130 \text{ Дж/мм}^2$. Для сварки встык пластин из алюминиевого сплава толщиной 5 мм требуются следующие значения удельной энергии $\epsilon_{\text{св}}$: при аргонодуговой сварке $\approx 300 \text{ Дж/мм}^2$; при контактной сварке $\approx 200 \text{ Дж/мм}^2$; при холодной сварке $\approx 30 \text{ Дж/мм}^2$.

Расчет удельной энергии $\epsilon_{\text{св}}$ для разных методов сварки плавлением коррозионно-стойкой стали типа 18–10 (рис. 1.9) показал, что с увеличением толщины изделия удельная сварочная энергия резко растет при использовании многослойной сварки. Например, аргонодуговая сварка вольфрамовым (АДВ) электродом обеспечивает получение стыкового сварного соединения для листов толщиной 15 мм при общих затратах энергии на все проходы до 1000 Дж/мм^2 . Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) благодаря кинжальному проплавлению за один проход позволяет соединить встык листы толщиной от 10 до 50 мм практически при одной и той же удельной энергии $30 \dots 60 \text{ Дж/мм}^2$. Использование плазменной дуги (ПД) и дугового разряда в вакууме (ВД) при узкой разделке позволяет потреблять при сварке меньше удельной энергии ($\epsilon_{\text{св}} = 150 \dots 300 \text{ Дж/мм}^2$), чем для дуги под флюсом (ДФ), для которой в зависимости от разделки кромок требуется $\epsilon_{\text{св}} = 400 \dots 600 \text{ Дж/мм}^2$.

Сравнение значений $\epsilon_{\text{и}}$ и $\epsilon_{\text{общ}}$ для однопроходной сварки стали показывает, что $\epsilon_{\text{и}}$ с уменьшением интенсивности источника возрастает примерно от $3 \dots 5 \text{ Дж/мм}^2$ для лазерной сварки до $200 \dots 400 \text{ Дж/мм}^2$ для газового пламени. В то же время общие затраты энергии $\epsilon_{\text{общ}}$, в которых учитываются, например, энергозатраты на вакуумирование для электронного луча (площадь сечения соединения $\approx 500 \text{ мм}^2$) и при КПД лазера ($\approx 1 \dots 15 \%$), в десятки раз выше для этих источников, чем для дуги в аргоне или для газового пламени (рис. 1.10).

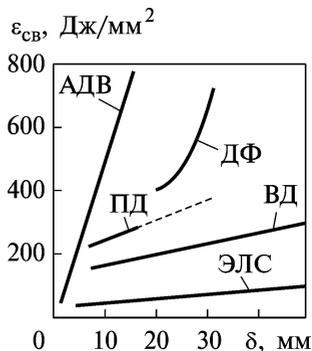


Рис. 1.9. Средние значения удельной энергии $\epsilon_{\text{св}}$ при сварке листов стали типа 18–10 толщиной до 50 мм различными способами

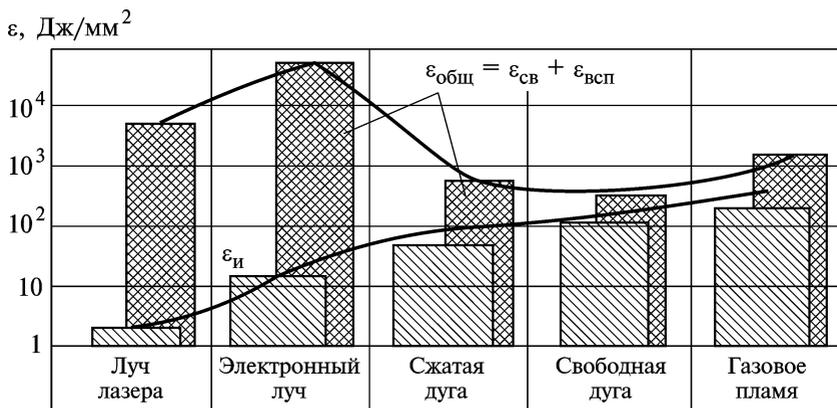


Рис. 1.10. Средние значения удельных энергий ϵ_i и $\epsilon_{общ}$, необходимых для однопроходной сварки стали различными методами

Пример 1.1. Определить удельную энергию $\epsilon_{ст}$ для различных способов сварки. Основные физические свойства металлов и сплавов приведены в табл. 1.7.

Решение. 1. *Сварка плавлением.* Рассмотрим сварку плавлением встык ванным способом двух алюминиевых стержней диаметром 20 мм. Согласно обобщенной схеме баланса энергии (см. рис. 1.6), существует внешний источник энергии, которая вносится в зону сварки с расплавленным электродным металлом. Удельное объемное теплосодержание расплавленного металла при температуре его плавления составляет $\Delta H = \rho(c_{пл}T_{пл} + q_{пл})$, где ρ – плотность; $c_{пл}$ – удельная теплоемкость; $T_{пл}$ – температура плавления, °С; $q_{пл}$ – скрытая теплота плавления металла. Минимальная удельная энергия, требуемая для сварки ванным способом, определяется как произведение ΔH и объема зоны (сварочной ванны) расплавленного металла, деленное на площадь сечения шва, т. е. как произведение ΔH и ширины B расплавленной зоны: $\epsilon_{ст} = \Delta H B$. Принимая ширину такого шва равной диаметру прутка, получаем

$$\epsilon_{ст} \approx 2,7 \cdot (1 \cdot 660 + 390) \cdot 2 = 5670 \text{ Дж/см}^2 = 56,7 \text{ Дж/мм}^2.$$

2. *Контактная стыковая сварка оплавлением.* В данном случае существует внутренний источник энергии – тепловыделение на контактом сопротивлении. Различие в минимальной требуемой энергии определяется (по сравнению со сваркой плавлением) лишь размерами расплавленной зоны. Используя исходные данные примера сварки плавлением, находим, что при глубине осадки по 5 мм минимальная удельная энергия составит:

$$\epsilon_{ст} = 28,35 \text{ Дж/мм}^2.$$

Таблица 1.7. Физические свойства некоторых металлов и сплавов

Материалы	Температура $T_{\text{пл}}$, К		Плотность, г/см ³			Удельная теплоемкость, Дж/(г·К)				Теплопроводность, Вт/(см·К)			Удельное электрическое сопротивление, мкОм·см			Теплота плавления L , Дж/г	Поверхностное натяжение σ_s , мДж/см
	соли-дуса T_c	лик-виду-са T_L	ρ_{293}	ρ_c	ρ_L	c_{293}	c_c	c_L	λ_{293}	λ_c	λ_L	γ_{293}	γ_c	γ_L			
Сплавы железа: Fe	1812	1812	7,86	7,1	7,0	0,64	0,7	0,69	0,75	0,33	0,34	9,7	130	135	270	18,5	
	1723	1773	7,83	7,2	6,9	0,47	0,64	0,74	0,48	0,35	0,35	15	120	125		17,5	
	1673	1732	7,9	7,24	6,95	0,49	0,65	0,72	0,15	0,35	0,35	80	125	130		17,1	
Сплавы алюминия: Al	933	933	2,7	2,56	2,38	0,96	—	1,09	2,2	2,2	1,03	2,76	11	25	390	8,6	
	858	903	2,64	—	—	0,921	—	1,3	1,17	1,35	1,0	6,7	—	—	—	7,0	
	916	927	2,73	—	—	1,09	—	—	1,80	—	0,88	4,1	—	—	—	7,85	
	775	911	2,77	—	—	0,837	—	—	1,74	—	—	4,3	—	—	—	8,1	
Сплавы титана: Ti	1941	1941	4,51	—	4,1	0,521	—	0,74	0,219	0,26	0,23	58,1	150	170	358,5	16,5	
	—	—	4,43	—	—	0,54	—	—	0,08	—	—	160	—	—	—	—	
Сплавы меди: Cu	1356	1356	8,94	—	8,3	0,385	—	0,47	3,87	3,5	3,5	1,72	9	21	205	13,5	
	1178	1183	8,5	8,63	8,0	0,385	0,38	0,42	1,1	—	—	—	—	—	—	—	
	924	924	1,74	—	1,58	1,047	—	1,32	1,67	1,6	0,8	4,46	15	27	357	5,8	
	1728	1728	8,9	—	—	0,45	—	—	0,89	—	—	6,84	—	—	300	17,7	

Примечание. Индексы «293», «с» и «л» идентифицируют температуру соответственно 293 К, солидуса и ликвидуса.

3. *Сварка трением.* Ширина зоны нагрева от «внутреннего» источника энергии при сварке трением значительно ниже, чем при контактной сварке оплавлением. Кроме того, процесс формирования шва обычно протекает при температурах, близких к температуре плавления сплава, но не превышающих ее, т. е. без затрат на скрытую теплоту плавления. При общей ширине пластической зоны формирования соединения около 5 мм минимальная удельная энергия составит

$$\varepsilon_{\text{ст}} = 2,7 \cdot 660 \cdot 0,5 = 891 \text{ Дж/см}^2 \approx 9 \text{ Дж/мм}^2.$$

4. *Холодная сварка.* Имеем «внутренний» источник энергии. Преобразование энергии сжатия деталей происходит в некотором активном объеме с одинаковой глубиной по обеим сторонам от шва. Энергия, требуемая для сварки, в данном случае также определяется как произведение среднего теплосодержания при температуре стыка около 600 °С (для алюминия) и глубины активной зоны, равной 1 мм:

$$\varepsilon_{\text{ст}} = 2,7 \cdot 600 \cdot 0,1 \cdot 2 = 324 \text{ Дж/см}^2 = 3,24 \text{ Дж/мм}^2.$$

5. *Сварка взрывом.* Экспериментально установлено, что для сварки алюминиевых пластин толщиной 1 мм требуется около 1 г взрывчатого вещества на 1 см² площади соединяемых деталей. Учитывая, что удельная энергия для взрывчатого вещества составляет ≈ 6000 Дж/г, получаем ориентировочную оценку:

$$\varepsilon_{\text{ст}} = 1 \cdot 6000 \text{ Дж/см}^2 = 60 \text{ Дж/мм}^2.$$

Сопоставление энергозатрат при рассмотренных способах сварки показывает, что способы сварки давлением менее энергоемки по сравнению со сваркой плавлением. Немаловажно и то, что при сварке в твердой фазе не требуется расходовать энергию на расплавление металла, что экономит около 15...30 % энергии.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют межатомные связи, какова их природа?
2. Каковы особенности ковалентной, ионной, металлической и молекулярной связей? Как эти особенности влияют на физические свойства кристаллов?
3. Какова сущность стадийности сварки?
4. В чем заключается основное отличие сварки плавлением от сварки давлением?
5. В чем состоит основное отличие сварки плавлением от пайки?
6. В чем заключается основное отличие пайки от склеивания?
7. Чем отличается физическое определение сварки от термодинамического?
8. Назовите основные признаки классификации сварочных процессов.
9. В каких случаях целесообразно использовать удельную энергию при оценке энергетической эффективности сварки?

Глава 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ДУГОВОМ РАЗРЯДЕ

2.1. Электрический разряд в газах

2.1.1. Виды разряда

В обычном (нормальном) состоянии газы являются хорошими электрическими изоляторами – диэлектриками. Однако, приложив достаточно сильное электрическое поле, можно вызвать нарушение изолирующих свойств газа (пробой) и его ионизацию: в газе возникают заряженные частицы, и он становится проводником, благодаря чему появляется возможность пропускать через проводник электрический ток и воздействовать на него электромагнитными полями. Протекание тока через газ получило название электрического разряда в газах (или газового разряда). Различают самостоятельный и несамостоятельный газовые разряды, последний прекращается при устранении внешнего источника ионизации. Явления, возникающие при протекании электрического тока через газ, зависят от рода и давления газа, от материала, из которого изготовлены электроды, от геометрии электродов и соединяющего их канала, а также от величины протекающего тока.

Газовый разряд может быть неустойчивым (например, искровым) и устойчивым (стационарным). В дальнейшем будем рассматривать только самостоятельные и стационарные газовые разряды. Их можно классифицировать по внешнему виду: *темновой* (таунсендовский), *тлеющий*, в том числе коронный, и *дуговой* разряды. Например, если в длинной цилиндрической стеклянной трубке, заполненной газом при давлении около 100 Па, медленно повышать разность потенциалов между катодом и анодом, то приборы фиксируют наличие тока начиная с 10^{-12} А. Он появляется вследствие вызываемой космическими лучами ионизации в объеме газа на стенках трубки и на электродах. С помощью ограничивающего сопротивления можно получить все три формы разряда (рис. 2.1). Темновой разряд переходит в тлеющий, который отличается уже заметным свечением, используемым в газосветных трубках. При этом катодное падение потенциала $U_k \geq 100$ В; плотность тока $j \approx 10^{-2} \dots 10^{-1}$ А/см².

Практически повсюду, за исключением приэлектродных областей, ионизованный газ электронейтрален, т. е. представляет собой

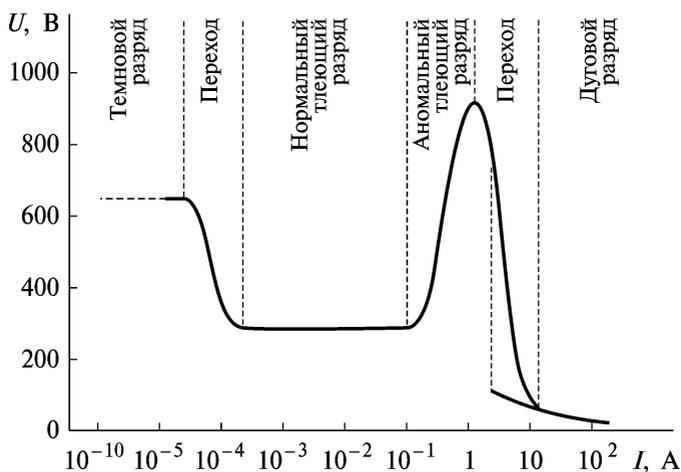


Рис. 2.1. Статическая вольт-амперная характеристика различных видов газового разряда

слабоионизованную неравновесную плазму. Это так называемый положительный столб тлеющего разряда. Температура атомов или молекул газа в тлеющем разряде практически не повышается и равна 300...350 К.

Затем через аномальный тлеющий разряд происходит переход к дуговому разряду (существующему, как правило, на токах более 1 А, низком общем напряжении – менее 100 В) с катодным падением потенциала $U_k \leq 20$ В и большой плотностью тока на катоде: $j_k \approx 10^2 \dots 10^5$ А/см². Дуговой разряд, или *дуга*, характеризуется высокой температурой газа в проводящем плазменном канале (при атмосферном давлении $T = 5000 \dots 50000$ К) и высокими концентрациями частиц в катодной области.

2.1.2. Возбуждение дуги и ее зоны

Возбуждение дуги возможно в следующих случаях:

- 1) при переходе из устойчивого маломощного газового разряда в дуговой (см. рис. 2.1);
- 2) в процессе создания высокоионизованного потока пара, перекрывающего межэлектродное пространство (в большинстве случаев с помощью третьего электрода);
- 3) при электрическом пробое газового или вакуумного промежутка между электродами, обеспечивающем переход из неустой-

чивого искрового разряда в устойчивый разряд (осуществляется подачей импульса высокой частоты и высокого напряжения);

4) при размыкании контактов или разрыве переключки между электродами в цепи с током.

При сварке плавящимся электродом обычно используют дугу размыкания, а при сварке неплавящимся вольфрамовым электродом – высокочастотный вспомогательный разряд от осциллятора. Импульс высокого напряжения получают обычно с помощью конденсатора. При сварке угольным (графитовым) электродом дугу возбуждают, используя чаще всего третий электрод.

В газовых промежутках (при атмосферном давлении) с резко неоднородным электрическим полем напряжение возбуждения самостоятельного дугового разряда не совпадает с напряжением пробоя, которому соответствует перекрытие газового промежутка плазменным каналом с падающей вольт-амперной характеристикой. В этих условиях сопротивление плазменного канала, перекрывающего межэлектродный промежуток разряда, становится меньше, чем сопротивление внешней цепи, включая внутреннее сопротивление источника напряжения. Поэтому правильно считать, что при достаточной мощности источника напряжения искровой пробой завершается образованием плазменного канала дуги.

В самостоятельном дуговом разряде начиная с токов выше нескольких ампер наблюдается неравномерное распределение потенциала и температуры между электродами (рис. 2.2, 2.3).

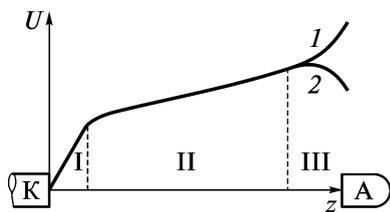


Рис. 2.2. Характерное распределение потенциала по длине дуги с положительным анодным падением потенциала (кривая 1) и с отрицательным анодным падением потенциала (кривая 2):

I – катодная область; II – столб дуги;
III – анодная область; К – катод;
А – анод

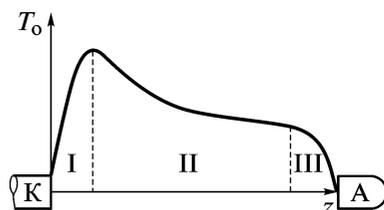


Рис. 2.3. Характерное распределение осевой температуры плазмы по длине дуги:

I – катодная область; II – столб дуги;
III – анодная область; К – катод; А – анод

Скачки потенциала в катодной и анодной областях обусловлены скоплениями пространственного заряда и повышенным сопротивлением этих областей по сравнению со столбом дуги.

Неравномерным оказывается и распределение температуры по длине столба дуги. Высокие значения температуры в столбе дуги (плазменном канале) снижаются до существенно меньших значений на поверхности электродов. Все это приводит к тому, что условия в приэлектродных областях заметно отличаются от условий в плазменном канале (шнуре), и, следовательно, при изучении процессов в дуге следует выделить три зоны: катодную 1, анодную 2 и столб дуги 3 (рис. 2.4).

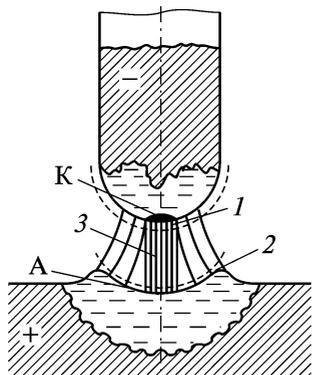


Рис. 2.4. Зоны дуги

В газовом промежутке между двумя электродами заряженные частицы могут возникнуть во всех трех зонах, но главным образом они появляются в результате процессов эмиссии на катоде и объемной ионизации в столбе дуги. В связи с ограниченностью эмиссии электронов столб дуги (как и любой проводник) вдали от катода сохраняет по отношению к нему положительный потенциал, поэтому часто его называют положительным столбом. В то же время не следует забывать, что плазма столба обычно квазинейтральна.

В газовой промежутке между двумя электродами заряженные частицы могут возникнуть во всех трех зонах, но главным образом они появляются в результате процессов эмиссии на катоде и объемной ионизации в столбе дуги. В связи с ограниченностью эмиссии электронов столб дуги (как и любой проводник) вдали от катода сохраняет по отношению к нему положительный потенциал, поэтому часто его называют положительным столбом. В то же время не следует забывать, что плазма столба обычно квазинейтральна.

В то же время не следует забывать, что плазма столба обычно квазинейтральна.

2.1.3. Вольт-амперная характеристика дуги

Для газового разряда сопротивление не является постоянным ($R \neq \text{const}$), так как число заряженных частиц в нем зависит от интенсивности ионизации и, в частности, от силы тока. Поэтому электрический ток в газах, как правило, не подчиняется закону Ома и вольт-амперная характеристика газового разряда обычно является нелинейной.

В зависимости от плотности тока вольт-амперная характеристика дуги может быть падающей, пологой и возрастающей (рис. 2.5). В области I при малых токах (примерно до 100 А) с увеличением тока дуги I_d интенсивно возрастает число заряженных частиц главным образом вследствие разогрева и роста эмиссии катода, а следовательно, и соответствующего ей роста объемной

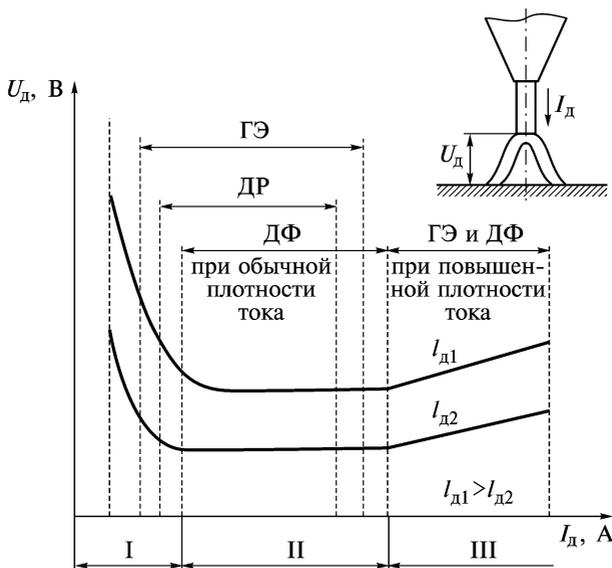


Рис. 2.5. Вольт-амперные характеристики сварочных дуг

ионизации в столбе дуги. Сопротивление столба дуги уменьшается и падает нужное для поддержания разряда напряжение U_d ; вольт-амперная характеристика дуги является падающей.

В области II при дальнейшем росте тока и ограниченном сечении электродов столб дуги несколько сжимается и объем газа, участвующего в переносе зарядов, уменьшается. Это приводит к меньшей скорости роста числа заряженных частиц. Напряжение дуги в этой области слабо зависит от тока, а вольт-амперная характеристика является полой. Первые две области на рис. 2.5 описывают сварочные дуги с так называемым отрицательным электрическим сопротивлением.

Падающая и полая вольт-амперные характеристики сварочных дуг типичны для ручной дуговой сварки штучными электродами с покрытием (РД) и газозлектрической ($\Gamma\Theta$) сварки, а также вообще для сварки при малых плотностях тока, в том числе и дугой под флюсом (ДФ).

Сварка при высоких плотностях тока и плазменно-дуговые процессы соответствуют области III на рис. 2.5. Они характеризуются сильным сжатием столба дуги и возрастающей вольт-амперной характеристикой, что указывает на увеличение энергии, расходуемой внутри дуги.

В сильноточных сжатых дугах степень ионизации газа в столбе дуги может достигать значений, близких к 100 %, а термоэмиссионная способность катода оказывается исчерпанной. В этом случае увеличение тока практически уже не может изменить числа заряженных частиц в дуге. Ее сопротивление становится положительным и почти постоянным ($R \approx \text{const}$). Высокоионизованная сжатая плазма по электропроводности близка к металлическому проводнику и для нее справедлив закон Ома.

2.2. Элементарные процессы в плазме дуги

2.2.1. Основные параметры плазмы

Как известно, плазма состоит из заряженных и нейтральных частиц. Положительно заряженными частицами плазмы являются положительные ионы (газовая плазма) и дырки (плазма твердого тела), а отрицательно заряженными частицами – электроны и отрицательные ионы.

Состав нейтрального компонента плазмы может быть достаточно сложным: помимо атомов и молекул, находящихся в нормальном состоянии, в плазме в гораздо большем количестве могут присутствовать атомы и молекулы в различных возбужденных состояниях. Но поскольку плазма – это ионизованный газ, для ее описания используются те же понятия, что и для обычного газа.

Введем основные параметры плазмы, исходя из простых молекулярно-кинетических представлений. Прежде всего необходимо знать *концентрацию* (плотность) частиц разного сорта n_α , м⁻³ (индекс α означает сорт частиц). Далее все величины, относящиеся к электронам плазмы, будем обозначать с индексом e , к ионам – с индексом i , а к нейтральным частицам – с индексом a . Если в плазме присутствуют ионы нескольких сортов, следует задавать отдельно концентрацию ионов каждого сорта. Состав плазмы удобно также характеризовать безразмерным параметром – отношением концентрации электронов к сумме концентраций нейтральных частиц и электронов, или *степенью ионизации* $\chi = \frac{n_e}{n_a + n_e}$. По степени ионизации плазму обычно подразделяют на слабо ионизованную ($\chi < 10^{-3}$) и полностью ионизованную ($\chi \rightarrow 1$), т. е. плазму, состоящую только из заряженных частиц.