

В. В. Овчинников

ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ДЛЯ СВАРКИ



«Инфра-Инженерия»

УДК 621.791
ББК 34.641
О-35

Рецензент :

Шаров В. М., кандидат технических наук,
генеральный директор ООО «НПО „Источник”»

Овчинников, В. В.

О-35 Источники питания для сварки : учебник / В. В. Овчинников. –
Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. – 244 с. : ил., табл.
ISBN 978-5-9729-0446-4

Изложены принципы действия типовых источников питания для дуговой и электрошлаковой сварки. Приведены примеры современных и перспективных источников и установок российского и иностранного производства. Рассмотрены правила эксплуатации источников. Сформулированы требования к сварочным свойствам источников.

Для студентов вузов машиностроительных специальностей.

УДК 621.791
ББК 34.641

ISBN 978-5-9729-0446-4

© В. В. Овчинников, 2020
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2020
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2020

Глава 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ДУГА И ЕЕ СВОЙСТВА

1.1. Природа сварочной дуги

Любое вещество характеризуется типом взаимосвязи молекул и атомов. Известны три основных состояния веществ – твердое, жидкое и газообразное, они отличаются расстояниями между атомами или молекулами. В твердом и жидком состояниях эти расстояния малы, этим объясняют малую сжимаемость твердых и жидких веществ и их общее название – «конденсированное состояние». В газах расстояние между молекулами значительно больше, поэтому они могут сравнительно легко сжиматься под воздействием внешнего давления. Электропроводность газов также существенно отличается от электропроводности веществ, находящихся в конденсированном состоянии. В твердых и жидких веществах электроны внешних оболочек легко теряют связь с ядром и свободно перемешаются по веществу. Свободные электроны, называемые электронами проводимости, являются носителями тока в конденсированных проводниках. Газы, в которых электроны связаны со своими ядрами, в обычных условиях ток не проводят, но в электрической дуге ионизируются и приобретают электропроводность.

Электрическая дуга представляет собой один из видов электрических разрядов в газах, при котором наблюдается прохождение электрического тока через газовый промежуток под воздействием электрического поля. Прохождение электрического тока через газ возможно только при наличии в нем заряженных частиц – электронов и ионов. Возникновение заряженных частиц в дуговом промежутке обуславливается эмиссией (испусканием) электронов с поверхности отрицательного электрода (катода) и ионизацией находящихся в промежутке газов и паров. Электрическую дугу, используемую для сварки металлов, называют *сварочной дугой*. В отличие от обычной дуги сварочная дуга представляет собой электрический дуговой разряд в ионизированной смеси не только газов, но и паров металла и компонентов, входящих в состав электродных покрытий, флюсов и т.д.

Если ионизированный воздушный промежуток находится в электрическом поле, то подвижные газовые ионы приходят в движение и создают электрический ток. Однако при ионизации наступает динамическое равновесие, заключающееся в том, что в каждую единицу времени восстанавливается столько

же молекул из ионов (молизация, рекомбинация), сколько распадается. Таким образом, как только прекращается действие ионизирующих факторов, исчезает электропроводность и ток прекращается.

Дуга является частью электрической сварочной цепи. При сварке на постоянном токе электрод, подсоединенный к положительному полюсу источника питания дуги, называют *анодом*, а к отрицательному – *катодом*. Если сварку ведут на переменном токе, то каждый из электродов является попеременно анодом или катодом. Промежуток между электродами называют областью дугового разряда, или *дуговым промежутком*; длину дугового промежутка – *длиной дуги*. Дуга, горящая между электродом и объектом сварки, является дугой прямого действия. Такую дугу принято называть свободной дугой, в отличие от сжатой, поперечное сечение которой принудительно уменьшено за счет сопла горелки, потока газа и электромагнитного поля.

Возбуждение дуги происходит следующим образом. При коротком замыкании электрода и детали в местах касания их поверхности разогреваются. При размыкании электродов с нагретой поверхности катода происходит испускание электронов – электронная эмиссия. Выход электронов в первую очередь связывают с термическим эффектом (термоэлектронная эмиссия) и наличием электрического поля высокой напряженности (автоэлектронная эмиссия). Наличие электронной эмиссии с поверхности катода считают непременным условием существования дугового разряда.

Зажигание дуги при сварке плавящимся электродом также начинается с короткого замыкания. Из-за шероховатости поверхностей касание электрода с основным металлом происходит отдельными выступающими участками, которые мгновенно расплавляются под действием выделяющейся теплоты, образуя жидкую перемычку между основным металлом и электродом. При быстром разведении электродов расплавленные перемычки растягиваются и сужаются, вследствие чего плотность тока в них доходит в момент разрыва до такой величины, что обращает их в пар. При высокой температуре паров металла ионизация промежутка столь значительна, что при сравнительно небольшой разности потенциалов между концами электродов возникает дуговой разряд. Разряд поддерживается далее как стационарная устойчивая дуга в том случае, если сохраняются факторы, поддерживающие ионизацию дугового промежутка.

По длине дугового промежутка можно выделить три области (рис. 1.1): катодную, анодную и находящийся между ними столб дуги. Катодная область включает в себя нагретую поверхность катода, называемую *катодным пятном*,

и часть дугового промежутка, примыкающую к ней. Протяженность катодной области мала, но она характеризуется повышенной напряженностью и протекающим в ней процессом эмиссии электронов, являющимся необходимым условием существования дугового разряда. Температура катодного пятна на стальных электродах достигает 2400...2700 °С.

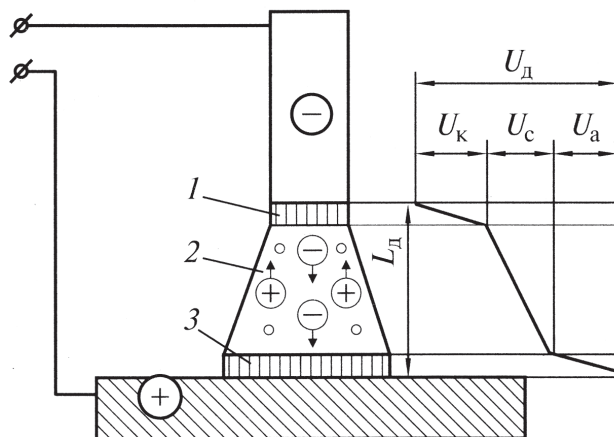


Рис. 1.1. Строение электрической дуги и распределение напряжений в ней:
1 и 3 – катодная и анодная области; 2 – столб дуги

В катодном пятне выделяется до 38 % общей теплоты дуги. Основным физическим процессом в этой области является разгон электронов. Падение напряжения в катодной области U_k составляет 10...20 В.

Анодная область состоит из анодного пятна на поверхности анода и части дугового промежутка, примыкающего к нему. Анодное пятно – место входа и нейтрализации свободных электронов в материале анода. Оно имеет примерно такую же температуру, как и катодное пятно, но в результате бомбардировки электронами на нем выделяется больше теплоты, чем на катоде. Анодная область также характеризуется повышенной напряженностью. Для дуг с плавящимся электродом анодное падение напряжения составляет 2...6 В. Протяженность этой области также мала.

Столб дуги, расположенный между катодной и анодной областями, имеет наибольшую протяженность в дуговом промежутке. Основным процессом здесь является ионизация, или образование заряженных частиц газа. Этот процесс происходит в результате соударения электронов и нейтральных частиц газа. При достаточной энергии соударения частицы газа теряют электроны

и образуют положительные ионы. Такую ионизацию называют ионизацией соударением. Соударение может произойти и без ионизации, тогда энергия соударения выделяется в виде теплоты и идет на повышение температуры дугового столба. Образующиеся в столбе дуги заряженные частицы движутся к электродам: электроны – к аноду, ионы – к катоду. Часть положительных ионов достигает катодного пятна, другая их часть не достигает катода и, присоединяя к себе отрицательно заряженные электроны, образует нейтральные атомы. Такой процесс нейтрализации частиц называют *рекомбинацией*. В столбе дуги при всех условиях горения наблюдается устойчивое равновесие между процессами ионизации и рекомбинации. В целом столб дуги нейтрален, так как в каждом его сечении одновременно находятся равные количества противоположно заряженных частиц. Температура столба дуги достигает 6000...8000 °С и более – в зависимости от плотности сварочного тока. Падение напряжения в столбе изменяется в пределах 10...50 В/см, зависит от состава газовой среды и уменьшается с введением в нее легкоионизирующихся компонентов. К ним относятся щелочные и щелочноземельные металлы (Ca, Na, K и др.).

Общее падение напряжения в дуге $U_d = U_K + U_c + U_a$.

Падение напряжения в столбе дуги можно представить как

$$U_c = El_{CT}, \quad (1.1)$$

где E – напряженность по длине;

l_{CT} – длина столба дуги.

Значения U_K , U_a , E практически зависят лишь от материала электродов и состава среды дугового промежутка и при их неизменности остаются постоянными при разных условиях сварки. В связи с малой протяженностью катодной и анодной областей можно считать практически $l_{CT} = l_d$, где l_d – длина дуги. Тогда справедливо выражение $U_d = a + bl_d$, где $a = U_K + U_a$; $b = E$. Отсюда следует, что напряжение дуги прямым образом зависит от ее длины.

Сварочные дуги классифицируются:

- по применяемым электродам – с плавящимся и неплавящимся;
- по степени сжатия дуги – свободная и сжатая;
- по схеме подвода сварочного тока – прямого и косвенного действия (рис. 1.2);
- по роду тока – постоянного и переменного (однофазного или трехфазного) тока;
- по полярности постоянного тока – прямой и обратной полярности.

Дугу называют *короткой*, если длина ее составляет 2...4 мм. Длина *нормальной* дуги составляет 4...6 мм. Дугу длиной более 6 мм называют *длинной*.

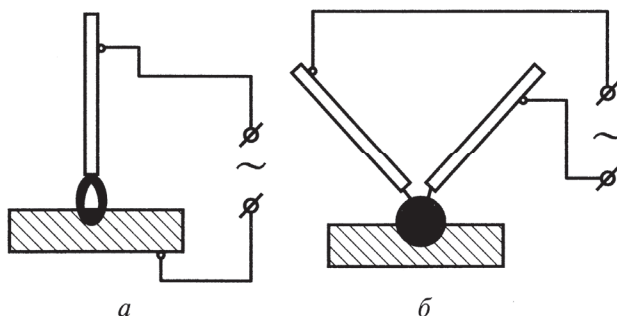


Рис. 1.2. Сварочные дуги прямого (а) и косвенного (б) действия

1.2. Условия зажигания и устойчивость горения дуги

Для получения качественного сварного соединения необходимо устойчивое горение дуги, или ее стабильность. Под стабильностью дуги подразумевают не только устойчивое горение, но и быстрое зажигание, малую чувствительность к изменениям длины дуги в определенных пределах, быстрое повторное зажигание (возбуждение) после обрыва, необходимое проплавление основного металла.

Условия зажигания и устойчивого горения дуги зависят от таких факторов, как род тока (постоянный или переменный), прямая или обратная полярность при сварке на постоянном токе, диаметр электрода, состав обмазки при сварке штучными электродами, температура окружающей среды.

Для зажигания дуги требуется большее напряжение, чем напряжение для горения дуги. Напряжение, подводимое от источника питания к электродам при разомкнутой сварочной цепи, является напряжением холостого хода. При сварке на постоянном токе напряжение холостого хода не превышает 90 В, а на переменном – 80 В. В момент горения дуги напряжение, подаваемое от источника питания, значительно снижается и достигает значения, необходимого для устойчивого горения дуги. В процессе горения дуги ток и напряжение находятся в определенной зависимости.

Зависимость напряжения дуги от тока в сварочной цепи при Условии постоянной длины дуги называют *статической вольт-амперной характеристикой дуги*. Такая характеристика представлена на рис. 1.3.

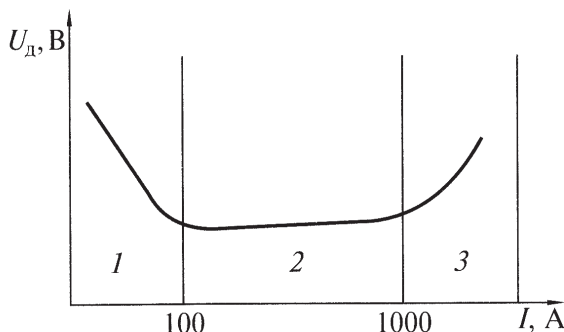


Рис. 1.3. Статическая вольт-амперная характеристика дуги

В области 1 (до 100 А) с увеличением тока напряжение значительно уменьшается, так как при повышении силы тока увеличивается поперечное сечение столба дуги и его проводимость. Вольт-амперная характеристика является падающей.

В области 2 (100...1000 А) при увеличении тока напряжение сохраняет постоянную величину, так как поперечное сечение столба дуги и площади анодного и катодного пятен увеличиваются пропорционально току. Вольт-амперная характеристика является жесткой, дуга горит устойчиво, обеспечивается нормальный процесс сварки.

В области 3 (свыше 1000 А) увеличение силы тока вызывает возрастание напряжения, так как из-за ограничения размеров катодного пятна площадью поперечного сечения электрода растет плотность тока. При этом вольт-амперная характеристика становится возрастающей. Дугу с падающей вольт-амперной характеристикой используют при ручной дуговой сварке штучными электродами и неплавящимся электродом в инертных газах, а с жесткой и возрастающей — при автоматической и механизированной сварке под флюсом и в защитных газах плавящимся электродом.

При механизированной сварке плавящимся электродом иногда оперируют вольт-амперной характеристикой дуги, снятой не при постоянной ее длине, а при постоянной скорости подачи электродной проволоки (рис. 1.4). Как видно из рис. 1.4, каждой скорости подачи электродной проволоки соответствует узкий диапазон токов с устойчивым горением дуги. Слишком малый сварочный ток может привести к короткому замыканию электрода с изделием, а слишком большой — к резкому возрастанию напряжения и ее обрыву.

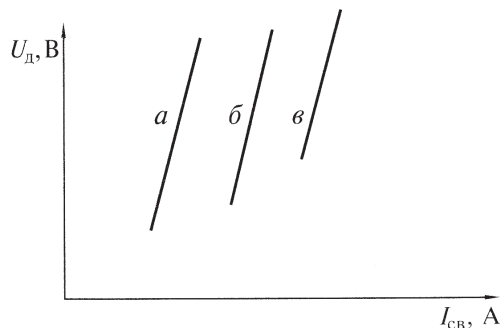


Рис. 1.4. Статическая вольт-амперная характеристика дуги при подаче электродной проволоки с разными скоростями:
а – малой; б – средней; в – большой

Итак, *первое условие* зажигания и горения дуги – наличие электрического источника питания дуги достаточной мощности, позволяющего быстро нагревать катод до высокой температуры при возбуждении дуги.

Устойчивость системы источник питания – дуга определяют внешней характеристикой источника, представляющей собой зависимость изменения напряжения источника (кривая 1, рис. 1.5) от сварочного тока. Свойства дуги определяют зависимость изменения напряжения дуги от сварочного тока, т.е. ее статической вольт-амперной характеристикой (кривая 2, рис. 1.5).

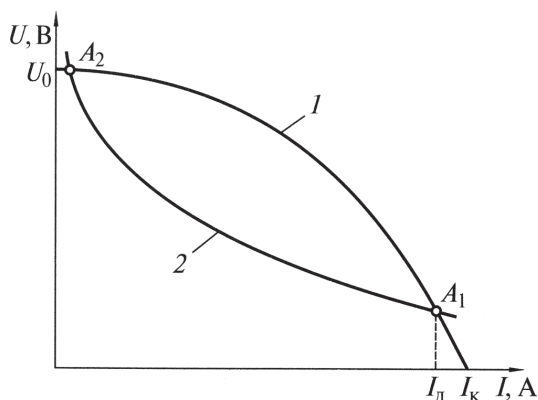


Рис. 1.5. Устойчивость системы источник питания – дуга

Система источник питания – дуга должна находиться в установившемся состоянии, которое определяется точками A_1 и A_2 . Пересечение внешней харак-

теристики источника с осью ординат определяет напряжение холостого хода источника U_0 , а с осью абсцисс – силу тока короткого замыкания I_K .

Точку A_2 называют точкой зажигания дуги, а точку A_1 – точкой устойчивого горения. Только в этих двух точках при данной внешней характеристике источника тока имеются условия, при которых дуга может гореть. Однако система всегда автоматически будет переходить в нижнюю рабочую точку, в которой только возможно устойчивое горение дуги. Если по какой-либо причине сила тока уменьшится, то напряжение источника возрастет, а ток дуги увеличится и будет соответствовать точке A_1 . Наоборот, при случайном увеличении силы тока напряжение источника будет меньше напряжения дуги, ток уменьшится, и режим горения дуги восстановится.

Если статическая характеристика дуги падающая, то для устойчивого горения дуги внешняя характеристика источника питания в рабочей точке должна быть более круто падающей, чем статическая характеристика дуги.

Более полная стабилизация горения дуги достигается при достаточной степени ионизации столба дуги, поэтому *вторым условием* для зажигания и горения дуги является введение в состав покрытия штучных электродов или в состав флюсов таких элементов, как калий, натрий, барий, литий, алюминий, кальций и др. Эти элементы обладают низким потенциалом ионизации и способствуют быстрому зажиганию дуги.

Третьим условием устойчивости горения дуги при сварке является включение в сварочную цепь последовательно с дугой индуктивного сопротивления, что позволяет вести сварочные работы металлическими электродами на переменном токе при напряжении сварочного трансформатора порядка 60...65 В и стандартной частоте тока.

При питании дуги переменным током полярность электрода и изделия и условия существования дугового разряда периодически изменяются. Дуга переменного тока промышленной частоты 50 Гц гаснет при переходе тока через нуль и перемене полярности в начале и конце каждого полупериода и вновь возбуждается 100 раз в секунду, или дважды за каждый период. Устойчивость горения такой дуги зависит от того, насколько легко происходит повторное возбуждение дуги в каждом полупериоде. Это определяется ходом физических и электрических процессов в дуговом промежутке и на электродах в отрезки времени между каждым затуханием и новым зажиганием дуги. Снижение тока сопровождается соответствующим уменьшением температуры в столбе дуги и степени ионизации дугового промежутка. Одновременно падает и температура активных пятен на аноде и катоде. Падение температуры несколько отстает

по фазе при переходе тока через нуль, что связано с тепловой инерционностью процесса. Особенно интенсивно падает температура активного пятна, расположенного на поверхности сварочной ванны, в связи с интенсивным отводом теплоты в массу детали.

Вслед за затуханием дуги меняется полярность напряжения (рис. 1.6) и направление движения заряженных частиц в дуговом промежутке. В условиях снижения температуры активных пятен и степени ионизации дугового промежутка повторное зажигание дуги в начале каждого полупериода происходит только при повышенном напряжении между электродами, именуемом *пиком зажигания*, или напряжением повторного зажигания дуги. Пик зажигания всегда выше напряжения дуги, соответствующего стабильному режиму ее горения. При этом величина пика зажигания несколько выше в тех случаях, когда катодное пятно находится на основном металле.

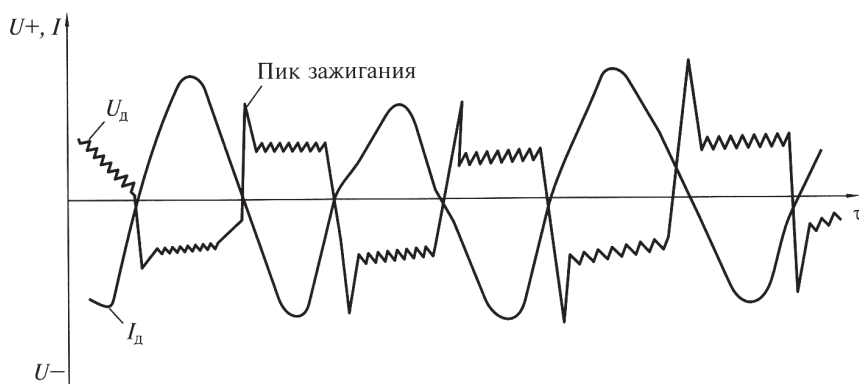


Рис. 1.6. Изменение полярности при горении дуги на переменном токе

Величина пика зажигания существенно влияет на устойчивость горения дуги переменного тока. Деионизация и охлаждение дугового промежутка возрастают с увеличением длины дуги, что приводит к необходимости дополнительного повышения пика зажигания. Затухание и обрыв дуги переменного тока при прочих равных условиях всегда происходят при меньшей длине дуги, чем при сварке на постоянном токе. При наличии в дуговом промежутке паров легкоионизирующихся элементов напряжение повторного зажигания снижается, и устойчивость горения дуги переменного тока повышается.

С увеличением силы тока физические условия горения дуги улучшаются, что также приводит к снижению пика зажигания и повышению устойчивости

дугового разряда. Таким образом, величина пика зажигания – важная характеристика дуги переменного тока, оказывающая существенное влияние на ее устойчивость. Чем хуже условия для повторного возбуждения дуги, тем выше должно быть напряжение холостого хода источника питания дуги и выше пик зажигания. Однако увеличение амплитудных значений синусоиды напряжения ограничивается правилами техники безопасности, по которым максимальное эффективное значение напряжения источника переменного тока для питания сварочных постов допускается не выше 80 В.

Общепринятая мера стабилизации сварочной дуги переменного тока – включение в сварочные цепи переменного тока дросселей, что позволяет поддерживать стабильность дуги и регулировать сварочный ток изменением индуктивного сопротивления.

При сварке на переменном токе неплавящимся электродом, когда материалы электрода и изделия резко различаются по своим теплофизическим свойствам, обнаруживается выпрямляющее действие дуги. Оно проявляется в виде протекания в цепи переменного тока некоторой составляющей постоянного тока, нарушающей симметрию кривых напряжения и тока относительно оси абсцисс (рис. 1.7). Наличие в сварочной цепи составляющей постоянного тока отрицательно сказывается на качестве сварного соединения и условиях процесса: уменьшается глубина проплавления, увеличивается напряжение дуги, значительно повышается температура электрода, увеличивается его расход. Поэтому приходится применять специальные меры для подавления действия постоянной составляющей. При включении дросселя в сварочную цепь переменного тока происходит сдвиг фаз между напряжением источника питания и током, горение дуги относительно стабилизируется. При сварке плавящимся электродом, близким по составу к основному металлу, на режимах, обеспечивающих устойчивое горение дуги, выпрямляющее действие дуги незначительно и кривые тока и напряжения практически симметричны относительно оси абсцисс.

При сварке на постоянном токе зажигание и горение дуги протекают несколько лучше, чем при сварке на переменном токе. Тем не менее для повышения стабильности горения дуги дроссели включают и в сварочную цепь постоянного тока.

Для улучшения возбуждения дуги применяют специальные высокочастотные устройства – осцилляторы, а для обеспечения надежного повторного возбуждения дуги – специальные генераторы импульсов высокого напряжения (стабилизаторы).

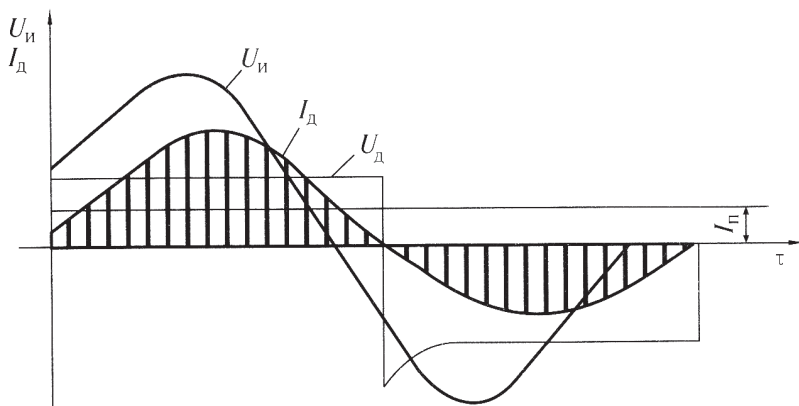


Рис. 1.7. Постоянная составляющая тока в сварочной цепи при горении дуги на переменном токе:

U_K – напряжение источника питания дуги; U_d – напряжение дуги;
 I_d – ток дуги; I_n – постоянная составляющая тока дуги; t – время

1.3. Технологические характеристики дуги

Под технологическими свойствами сварочной дуги понимают совокупность ее теплового, механического и физико-химического воздействия на свариваемый материал, определяющую интенсивность плавления электрода, характер переноса электродного металла, проплавление основного металла, формирование и качество шва. К технологическим свойствам дуги относят также ее пространственную устойчивость и эластичность. Технологические свойства дуги взаимосвязаны и зависят от параметров режима сварки.

Важные технологические характеристики дуги – *зажигание и стабильность горения дуги*. Условия ее зажигания и горения зависят от рода тока, полярности, химического состава электродов, межэлектродного промежутка и длины дуги. Для надежного обеспечения процесса зажигания дуги необходимо подведение к электродам от источника питания достаточно высокого напряжения холостого хода, но в то же время безопасного для работающего. Напряжение холостого хода сварочных источников не превышает 80 В при сварке на переменном токе и 90 В – на постоянном. Обычно напряжение зажигания дуги больше напряжения горения дуги на переменном токе в 1,2...2,5 раза, на постоянном токе – в 1,2...1,4 раза. Время установления дугового разряда составляет $10^{-5} \dots 10^{-4}$ с. Непрерывное горение дуги будет поддерживаться,

если приток энергии в дугу компенсирует ее потери. Горящая дуга может быть растянута до определенной длины, после чего она гаснет. Чем выше степень ионизации в дуговом промежутке, тем длиннее может быть дуга. Максимальная длина горящей без обрыва дуги характеризует ее важнейшее технологическое свойство – стабильность, которая зависит от целого ряда факторов: температуры катода, его эмиссионной способности, степени ионизации среды, свариваемых материалов.

К технологическим характеристикам дуги относят также *пространственную устойчивость и эластичность*. Под этим понимают способность сохранения дугой неизменности пространственного положения относительно электродов в режиме устойчивого горения и возможность отклонения и перемещения без затухания под действием внешних факторов. Такими факторами могут быть магнитные поля и ферромагнитные массы, с которыми дуга может взаимодействовать. При этом взаимодействии наблюдается отклонение дуги от естественного положения в пространстве.

Отклонение столба дуги под действием магнитного поля, наблюдаемое в основном при сварке постоянным током, называют *магнитным дутьем*. Его возникновение объясняется тем, что в местах изменения направления тока создаются магнитные поля различной напряженности. Дуга служит своеобразной газовой токоведущей вставкой между электродами и, как любой проводник, взаимодействует с магнитными полями. При этом столб сварочной дуги можно рассматривать в качестве гибкого проводника, который под воздействием магнитного поля может перемещаться, деформироваться и удлиняться. Это приводит к отклонению дуги в сторону, противоположную большей напряженности. При сварке переменным током, когда полярность меняется с частотой тока, это явление выражено значительно слабее. Отклонение дуги также имеет место при сварке вблизи ферромагнитных масс (железо, сталь). Это объясняется тем, что магнитные силовые линии проходят через ферромагнитные массы, обладающие хорошей магнитной проницаемостью, значительно легче, чем через воздух. Дуга в этом случае отклоняется в сторону таких масс.

Магнитное дутье вызывает непровары и ухудшает формирование швов. Для его устранения изменяют место токоподвода к изделию (рис. 1.8, *а – в*) или угол наклона электрода (рис. 1.8, *г*) или размещают вблизи сварного соединения балластные ферромагнитные массы, выравнивающие несимметричность магнитных полей, а также заменяют постоянный ток переменным.

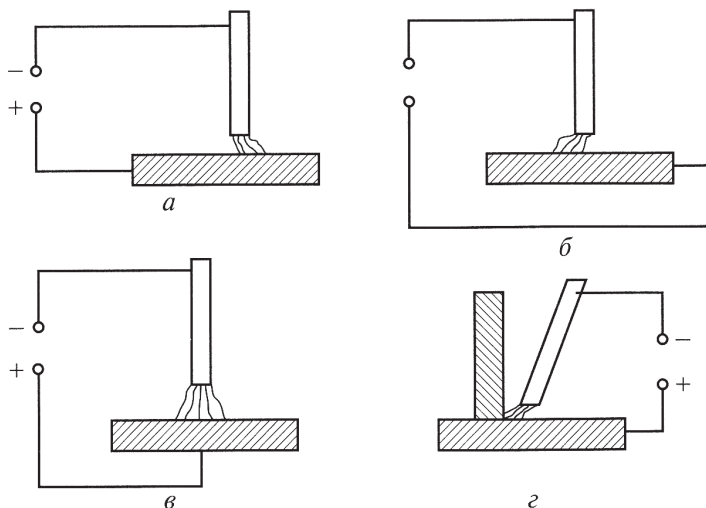


Рис. 1.8. Отклонение дуги в зависимости от места подвода тока к свариваемой детали и наклона электрода:

а – г – возможные варианты

1.4. Характеристики источников питания для дуговой сварки и требования к ним

Сварочная дуга вместе с источником питания образует динамичную систему, которую дополняют устройством подачи электрода в зону сварки и средствами ионизации дугового промежутка и защиты шва. В простейшем случае подачу электрода в зону сварки осуществляют вручную. В ходе технологического процесса эта система подвергается воздействию ряда возмущающих факторов: изменениям длины дуги, колебаниям напряжения, скорости подачи электрода, переходом капель расплавленного металла с электрода на изделие. Таким образом, постоянно возникают резкие изменения режима и переходные процессы, нарушающие равновесное состояние. Между тем не только нарушение устойчивости, но и относительно кратковременные отклонения режима от заданного приводят к нарушению процесса. Из этого следует, что для обеспечения качества сварки система должна обладать устойчивостью, под которой понимают ее способность возвращаться в исходное состояние равновесия при воздействии возмущающих факторов.

Общий анализ устойчивости. Уравнение электрической цепи при луговой сварке можно записать в следующем виде:

$$U_{\text{и}}(i) = U_{\text{д}}(i) + L(di/dt), \quad (1.2)$$

где $U_{\text{и}}(i)$, $U_{\text{д}}(i)$ – вольтамперные характеристики (ВАХ) источника и дуги соответственно;

L – индуктивность сварочной цепи.

При равновесном состоянии системы имеем:

$$L(di/dt) = 0; U_{\text{и}}(i) = U_{\text{д}}(i), \quad (1.3)$$

что графически выражается точкой пересечения ВАХ источника и дуги. Предположим теперь, что вследствие каких-либо возмущающих воздействий произошло внезапное изменение тока, и он стал равен

$$i = i_0 \pm \Delta i_0, \quad (1.4)$$

где i_0 – ток в установившемся режиме;

Δi_0 – величина его отклонения в начальный момент времени, которая может иметь любой знак.

Разложив в ряды функции и ограничиваясь линейными членами, найдем из уравнения (1.2):

$$\Delta i = \Delta i_0 \exp\{- (t/L)[(dU_{\text{д}}(i)/di) - dU_{\text{и}}(i)/di]\}, \quad (1.5)$$

откуда следует, что ток будет экспоненциально затухать в том случае, если выполнится условие:

$$K_y = [(dU_{\text{д}}(i)/di) - dU_{\text{и}}(i)/di] > 0, \quad (1.6)$$

Выражение (1.6) именуется *общим условием устойчивости*, а его левая часть называется *коэффициентом устойчивости*. Графическое решение уравнения (1.5) для зоны ручной дуговой сварки показано на рис. 1.9.

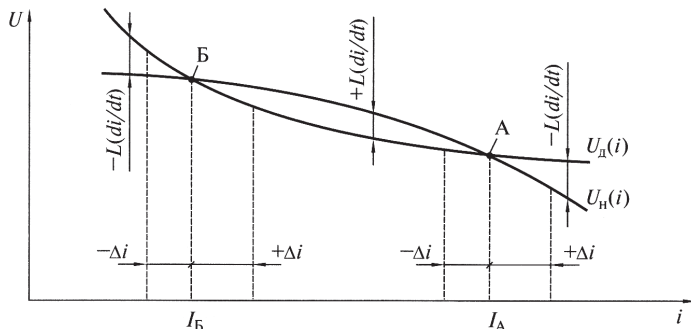


Рис. 1.9. Условия устойчивости системы «источник питания – сварочная дуга»

Равновесие по току имеет место в двух точках – А и Б. Однако при увеличении тока в точке Б имеем:

$$L(di/dt) > 0; \quad U_{\text{и}}(i) > U_{\text{д}}(i) \quad (1.7)$$

и дополнительное приращение тока, следовательно, процесс становится неустойчивым. При отклонении тока в меньшую сторону имеем:

$$L(di/dt) < 0; \quad U_{\text{и}}(i) < U_{\text{д}}(i). \quad (1.8)$$

Наблюдаем дополнительное его уменьшение, следовательно, процесс также неустойчив. Напротив, в точке А равновесие устойчиво. При положительном приращении тока справедливо выражение (1.8), но отрицательная разность напряжений источника и дуги стремится уменьшить ток. При уменьшении тока согласно условию (1.5) разность напряжений источника и дуги положительна и стремится увеличить ток, возвращая систему в равновесное состояние. Часто условие устойчивости формулируют так: *система устойчива, если ВАХ источника круче, чем ВАХ дуги*.

При ручной дуговой сварке возможны существенные изменения длины дуги, которые не должны приводить к нарушению устойчивости процесса. Свойство дуги изменять свою длину без разрыва называют *эластичностью*. Эластичность дуги при малых токах существенно зависит от ВАХ источника (рис. 1.10).

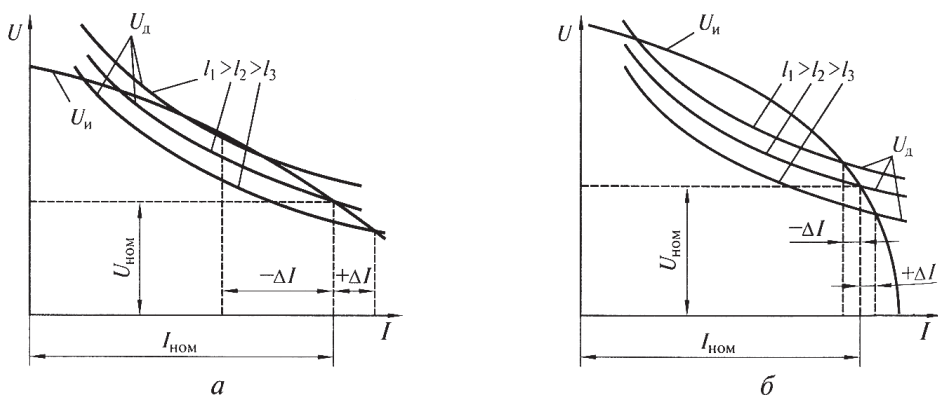


Рис. 1.10. Изменение тока сварки при колебаниях длины дуги для источников пологой (а) и крутопадающей (б) ВАХ

Источник с пологопадающей ВАХ не обеспечивает устойчивости при увеличении длины дуги (рис. 1.10, а). Источник с крутопадающей ВАХ при тех же условиях дает значительно меньшие колебания тока, более устойчив, обеспечивает лучшие условия работы и более высокое качество шва (рис. 1.10, б).

Условия устойчивости при сварке на восходящей части ВАХ дуги.

Условие устойчивости (1.6) справедливо и при работе на восходящей части ВАХ дуги, что характерно для автоматической и полуавтоматической сварки в среде защитных газов, однако требования к ВАХ источника в этом случае иные. Это связано с необходимостью обеспечить достаточно большие значения токов короткого замыкания, что невозможно при падающих характеристиках, а также с тем, что напряжение зажигания лишь незначительно превышает напряжение дуги, и, наконец, с эффектом саморегулирования дуги.

При постоянной скорости подачи электродной проволоки в зону сварки случайное удлинение дуги приводит к изменению ее ВАХ (с 7-й позиции на 2-ю) и уменьшению тока сварки с I_1 до I_2 (рис. 1.11, а). Уменьшение тока сварки приводит к соответствующему снижению скорости плавления электрода, поэтому при постоянной скорости подачи он приближается к изделию, и дуга укорачивается. Ток возрастает, рабочая точка возвращается в исходную позицию. Аналогичным образом, но в другом направлении идет процесс саморегулирования при случайном укорочении дуги (позиция 3). При малых изменениях тока, что соответствует крутопадающей ВАХ источника, эффект саморегулирования практически отсутствует, что затрудняет ведение сварки. На рис. 1.11, б показаны характеристики дуги и источника при возмущениях со стороны источника, например колебаниях выходного напряжения. В этом случае полного восстановления предшествовавшего режима не происходит, но изменения тока при этом невелики, и точки пересечения ВАХ 2 и 3 источника с ВАХ дуги характеризуют новые устойчивые состояния.

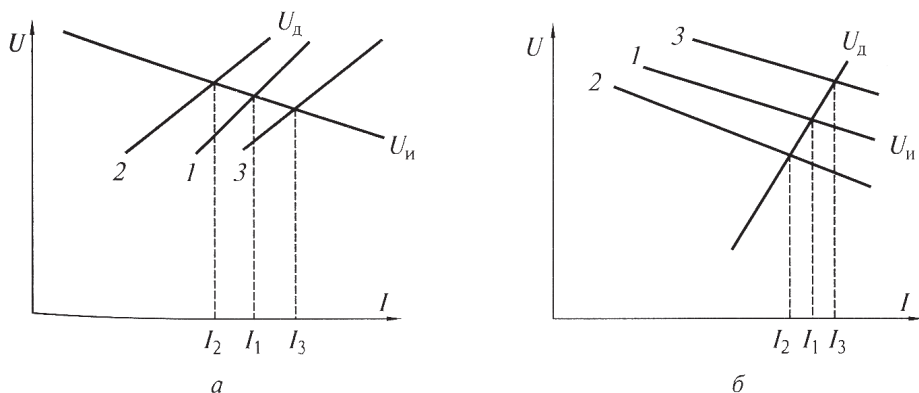


Рис. 1.11. Саморегулирование сварочной дуги (а) и изменение тока сварки при колебаниях первичного напряжения (б)

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ДУГА И ЕЕ СВОЙСТВА	5
1.1. Природа сварочной дуги.....	5
1.2. Условия зажигания и устойчивого горения дуги.....	9
1.3. Технологические характеристики дуги	15
1.4. Характеристики источников питания для дуговой сварки и требования к ним	17
1.5. Единая система обозначений оборудования.....	25
Глава 2. СВАРОЧНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ	27
2.1. Общие сведения	27
2.2. Сварочные трансформаторы с механическим регулированием.....	38
2.3. Трансформаторы, регулируемые подмагничиванием	46
2.4. Тиристорные трансформаторы.....	52
2.5. Выбор трансформаторов для разных способов сварки.....	59
Глава 3. ВЫПРЯМИТЕЛИ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ	63
3.1. Общие сведения	63
3.2. Полупроводниковые вентили	64
3.3. Схемы выпрямления.....	65
3.4. Однопостовые сварочные выпрямители.....	73
3.5. Источники питания с частотным преобразователем (инверторные)	105
3.6. Многопостовые источники питания	137
Глава 4. СВАРОЧНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ, ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И АГРЕГАТЫ	145
4.1. Классификация машинных источников питания.....	145
4.2. Принципы работы коллекторных сварочных генераторов.....	146
4.3. Принципы работы вентильных сварочных генераторов	159
4.4. Сварочные преобразователи.....	167
4.5. Сварочные агрегаты	175
Глава 5. СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ СВАРОЧНЫЕ ИСТОЧНИКИ	200
5.1. Вспомогательные устройства	200

5.2. Источники для сварки неплавящимся электродом в инертном газе	206
5.3. Источники питания для сварки сжатой дугой.....	214
5.4. Источники питания для дуговой сварки плавящимся электродом	216
5.5. Источники питания для электрошлаковой сварки	226
5.6. Подключение и техническое обслуживание трансформаторов	228
5.7. Техническое обслуживание выпрямителей	232
Список литературы.....	239