## Раздел 5. СВАРОЧНАЯ ДУГА.

### 5.1. Возникновение и строение сварочной дуги.

Возникновение сварочной дуги. ***Сварочной дугой называется устойчивый электрический разряд в ионизированной смеси газов и паров материалов, используемых при сварке***. Сварочная дуга характеризуется большой плотностью тока, высокой температурой и сильным свечением. Возникновение сварочной дуги происходит в несколько этапов (рис. 5.1). На рис. 5.2 показана схема горения сварочной дуги.

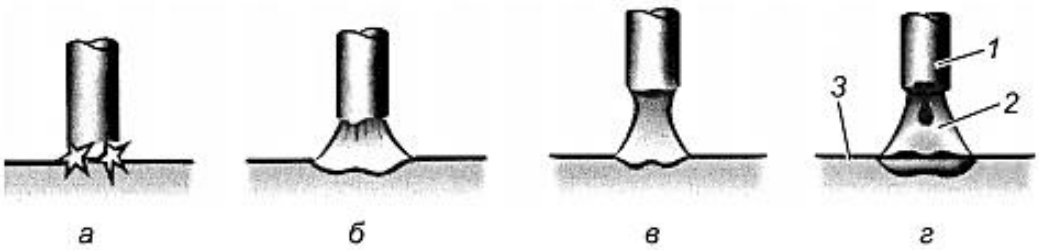


*Рис. 5.1.* **Возникновение сварочной дуги:**
*а* – короткое замыкание; *б* – образование прослойки из жидкого металла; *в* – образование шейки; *г* – возникновение дуги: *1* – электрод; *2* – дуга; *3* – основной металл

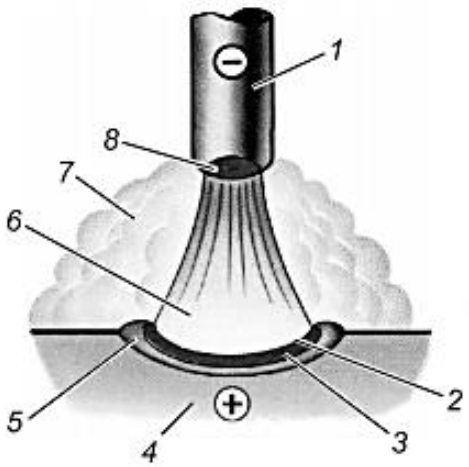


*Рис. 5.2.* **Схема горения сварочной дуги:**
*1* – электрод; *2* – кратер; *3* – анодное пятно; *4* – свариваемый металл; *5* – сварочная ванна; *6* – столб дуги; *7* – газовое облако; *8* – катодное пятно

Процессы в сварочной дуге. Возникает дуга при прохождении электрического тока через газ. Любой газ при комнатной температуре и нормальном давлении состоит из электрически нейтральных молекул и является изолятором, поскольку в нем нет носителей тока – электрически заряженных частиц.

Для образования и поддержания горения дуги необходимо иметь в промежутке между электродами электрически активные отрицательно заряженные частицы – электроны, а также положительные – ионы.

***Процесс образования электронов и ионов называется ионизацией***, а газ, содержащий электроны и ионы, ионизированным.

Ионизацию можно выразить уравнением

$A^\circ \rightarrow A^+ + e^-$,

где $A^\circ$ – нейтральный атом; $A^+$ – положительный ион; $e^-$ – свободный электрон.

Ионизация дугового промежутка происходит во время зажигания дуги за счет эмиссии электронов с катода и не$ прерывно поддерживается в процессе горения (рис. 5.3).

***Эмиссия*** – появление электронов проводимости. В сварочной дуге происходит также ***рекомбинация*** – объединение отрицательных электронов и положительных ионов в нейтральные атомы**.** Сварочная дуга характеризуется плотностью тока.

***Плотность тока*** – величина, численно равная отношению силы тока к площади поперечного сечения проводника.

Рис. 5.3. Процессы в сварочной дуге: – электроны; ⊕ – положительные ионы

**Строение сварочной дуги.** Ионизированный газ концентрируется в объеме около 1 см³. Но и в этом небольшом пространстве можно выделить три области (рис. 5.4). Две из них – *катодная lк* и *анодная lа* – пограничные между электродами и ионизированным газом. В этих областях наблюдается значительное падение напряжения, вызванное образованием около электродов пространственных зарядов (скоплением заряженных частиц). Третья *область, расположенная между катодной и анодной областями, называется столбом дуги lст.*

На поверхности анода и катода образуются электродные пятна (они представляют собой основание столба дуги), через которые проходит сварочный ток. Электродные пятна выделяются яркостью свечения.

Общая *длина сварочной дуги lд* равна сумме длин всех трех областей:

$l_д = l_а + l_к + l_{ст}$.

Длина дуги при ручной дуговой сварке обычно составляет 3–5 мм. Причем катодная и анодная области имеют малую протяженность: $10^{-6}$–$10^{-4}$мм.

Общее напряжение сварочной дуги *Uд* слагается из суммы падений напряжений в отдельных областях дуги:

$$Uд = Uк + Uст + Ua,$$

где *Uк, Uст, Ua* – соответственно падение напряжения в катодной области, столбе дуги и анодной области.

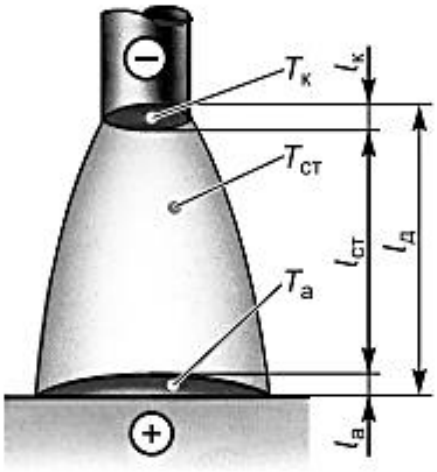

Рис. 5.4. Строение сварочной дуги

В сварочных дугах *Uд* обычно составляет 10–60 В. Падение напряжения в катодной области *Uк* часто принимают равным потенциалу ионизации газов. Потенциал ионизации паров железа Ui Fe = 7,8 ≈ 8 В. Падение напряжения в анодной области при ручной дуговой сварке по$ крытыми электродами примерно *Ua* = 6 В. Сумму падения напряжений в катодной и анодной областях можно определить, постепенно уменьшая длину дуги и замеряя напряжение при минимальной ее длине, когда падением напряжения в столбе дуги можно пренебречь. Падение напряжения в столбе дуги обычно составляет примерно 2 В на 1 мм длины дуги. Таким образом, напряжение дуги длиной 4 мм будет $Uд = Uк + Uст + Ua \approx 8+2 \cdot 4+6 \approx 22$ В.

**Распределения температур и выделяющейся теплоты в дуге**. Дуговой промежуток (см. рис. 5.4) состоит из наиболее нагретых участков электрода и основного металла (катодное и анодное пятна) и из столба дуги. Сварочная дуга отличается большой концентрацией теплоты и высокой температурой. Температура в столбе сварочной дуги *Тст* может быть от 5000 до 12 000 °С и зависит от плотности тока, состава газовой среды дуги, материала и диаметра электрода.

Ориентировочно температуру дуги для ручной дуговой сварки плавящимся стальным электродом можно определить по формуле

$$Тд = 800\ Ui\ ,$$

где *Ui* – потенциал ионизации газа дуги.

При ручной дуговой сварке покрытыми электродами температура дуги достигает 6000–8000 °С. Температура катода *Тк* составляет примерно 3000 °С, а анода *Та* достигает 4000 °С.

В катодном пятне сварочной дуги выделяется ~36% основного количества теплоты дуги, в столбе дуги ~21%, в анодном пятне ~43% общей теплоты дуги.

**Процессы в столбе дуги.** Столб дуги заполнен заряженными частицами. Почти всегда там присутствуют и нейтральные частицы – атомы и даже молекулы паров веществ, из которых сделаны электроды, и газов, окружающих дугу. На движение частиц в дуге оказывают действие электромагнитные силы и газовые потоки.

Наибольшую скорость имеют электроны. Они легко разгоняются и, сталкиваясь с атомами и ионами, передают им свою энергию. Столкновения электронов с атомами могут быть упругими и неупругими.

При упругих столкновениях атом, в который попал электрон, начинает двигаться быстрее – увеличивается его кинетическая энергия. В результате повышается температура дуги.

Электрон, который в электрическом поле приобрел достаточно большое количество энергии, может неупруго столкнуться с атомом, выбив из него электроны. Атом при этом становится положительным ионом: однозарядным, если выбит один электрон, двузарядным – если два, и т.д.

Энергия, которая должна быть сообщена электрону для ионизации какого-либо атома, измеряется в электронвольтах (эВ) и называется потенциалом ионизации. Его величина зависит от строения атома. Чем меньше номер группы и больше номер периода в таблице элементов Д.И. Менделеева, тем меньше энергии необходимо затратить для ионизации (табл. 5.1). Наименьшим потенциалом ионизации (3,9 эВ) обладает атом цезия. Он самый тяжелый из всех щелочных металлов. Самый легкий из инертных газов – гелий – обладает наивысшим потенциалом ионизации (24,5 эВ).

*Табл. 5.1. Первые потенциалы ионизации Ui некоторых атомов.*

| Атом | Cs | K | Na | Ca | Fe | O | Ar | F | He |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $U_i$, эВ | 3,9 | 4,3 | 5,1 | 6,1 | 7,8 | 13,6 | 15,7 | 18,6 | 24,5 |

При температуре сварочной дуги ~6000 °С происходит *диссоциация (разделение) молекул химических соединений*. Все вещества испаряются и пребывают в газообразном состоянии. Энергия частиц при этом становится настолько большой, что они производят неупругие соударения, вызывающие ионизацию атомов. Ионизация, происходящая за счет высокой температуры газа, называется ***термической ионизацией***.

Уравнение термической ионизации:

$A^{\circ} + e^{-} = A^{+} + 2e^{-}$,

где $A^{\circ}$ – нейтральный атом; $A^{+}$ – положительный ион; $e^{-}$ – свободный электрон.

При ионизации атомов электроны выходят за пределы атома и становятся свободными носителями электрических зарядов. Если же для отрыва электрона от атома энергии недостаточно, то электрон возбуждается и переходит на более отдаленную орбиту. Но на ней он долго удержаться не может, возвращается на свою прежнюю орбиту и при этом испускает квант света. В сварочной дуге таких электронов образуется очень много (миллионы в секунду), что и является причиной яркого свечения.

Энергия, расходуемая на диссоциацию различных молекул, также различна. Так, например, для диссоциации молекулы водорода необходимо затратить 4,48 эВ, фтора – 1,6 эВ, а углекислого газа – 9,7 эВ.

Для поддержания равновесного состояния плазмы дуги наряду с *прямыми процессами*, требующими затраты энергии, такими, как *диссоциация, возбуждение и ионизация*, необходимы и обратные процессы. Особо важное значение имеют процессы *деионизации,* т.е. переход электрически заряженных частиц в электрически нейтральное состояние. Из процессов деионизации отметим рекомбинацию:

$A^{+} + e^{-} = A^{o}$ , т.е. объединение положительного иона с электроном и отдачей освободившейся энергии в виде излучения.

**Явления, происходящие у катода и анода**. Процессы, которые происходят у поверхности электродов, сложные. Именно здесь прерывается течение электронов по металлическому проводнику-электроду и образуется ток дуги, который создается как электронами, так и ионами. Изменяется характер не только электрических, но и термических явлений. Горячая плазма дуги, температура которой 5000–12 000 °С, граничит со сравнительно холодной поверхностью электродов, нагретых всего до 2000–3000 °С.

Протяженность переходных областей очень мала и в обычных сварочных условиях составляет тысячные доли миллиметра. Через катод и анод в металл поступает основная часть теплоты.

**Устойчивость горения дуги.** *Устойчивой является дуга, горящая равномерно, без произвольных обрывов,* требующих повторного зажигания. Если дуга горит неравномерно, часто обрывается и гаснет, то она называется неустойчивой.

Устойчивость дуги зависит от многих причин, основными из которых являются род тока, состав покрытия электрода, вид электрода, полярность и длина дуги. При переменном токе дуга горит менее устойчиво, чем при постоянном. Это объясняется тем, что в тот момент, когда ток падает до нуля, ионизация дугового промежутка уменьшается и дуга может погаснуть.

**Для повышения устойчивости горения** сварочной дуги в электродное покрытие вводят элементы (калий, натрий и др.), которые повышают степень ионизации и, следовательно, увеличивают стабилизацию горения сварочной дуги.

Сварочную дугу можно возбудить без касания электродом свариваемого изделия. Для этого нужно в сварочную цепь параллельно включить источник тока высокого напряжения и высокой частоты (осциллятор). При этом для возбуждения дуги достаточно приблизить конец электрода к поверхности изделия на расстояние 2–3 мм.

**Тепловые свойства дуги**. Наиболее важными для процесса сварки являются тепловые свойства дуги. Тепловые возможности сварочной дуги измеряются ее тепловой мощностью. Мощность сварочной дуги $Q$ зависит от силы сварочного тока $I$ и напряжения дуги $Uд$ :

$$Q = IUд.$$

Теплота, выделяемая сварочной дугой, не вся переходит в сварной шов. Часть ее теряется на нагрев окружающей среды, плавление электродного покрытия или флюса, угар, разбрызгивание металла, световое излучение и т.п.

Мощность дуги, используемая на нагрев и расплавление основного и присадочного металла, называют ***эффективной тепловой мощностью*** $Qэф$:

$$Qэф = \eta IUд,$$

где η – коэффициент полезного действия дуги.

Коэффициент полезного действия при сварке тонкопокрытыми электродами составляет 0,5–0,65; электродами с толстым покрытием – 0,7–0,85; под флюсом – 0,8– 0,92; в защитных газах – 0,6–0,7.

Для определения затрат теплоты при сварке используют понятие ***погонной энергии сварки*** – это количество теплоты, вводимой в металл в единицу времени, отнесенное к единице длины шва. Погонную энергию сварки (Дж/м) определяют по формуле

$$q_п = Q_{эф} / \upsilon_{св},$$

где $\upsilon_{св}$ – скорость сварки, м/ч.