

## ФИЗИКА

DOI: 10.24412/2077-8481-2024-1-108-117

УДК 537.523.5:621.791.75

**А. И. ЛЯПИН**, канд. физ.-мат. наук, доц.

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

### ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОБЛАСТИ «ХОЛОДНОГО» КАТОДА СВАРОЧНОЙ ДУГИ В ПАРАХ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

#### Аннотация

Обобщенная модель элементарных процессов в области «холодного» катода сварочной дуги основана на известных экспериментальных данных, которые получены при исследовании перехода от тлеющего разряда к дуговому разряду. Указанная модель базируется на следующих представлениях: источником свободных электронов является металлический катод сварочной дуги; электроны покидают «холодный» катод в результате действия электрического поля пространственных зарядов и нагрева; генерация свободных носителей заряда в газе происходит в результате ионизации за счет энергии электрического поля. Показано, что обобщенная модель может объяснить большие значения разрядного тока в случае «холодных» катодов. Результаты оценочных расчетов тока дуги со стальным катодом при температуре, равной  $T = 2500$  К, близки к известным опытным данным.

#### Ключевые слова:

электросварочная дуга, «холодный» катод, катодная область, элементарные процессы, обобщенная модель процессов.

#### Для цитирования:

Ляпин, А. И. Обобщенная модель элементарных процессов в области «холодного» катода сварочной дуги в парах при атмосферном давлении / А. И. Ляпин // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 1 (82). – С. 108–117.

#### Введение

Известно, что процессы, необходимые для зажигания и стационарного горения сварочной дуги протекают в ее катодной области. По нашим данным в настоящее время отсутствует общепризнанная модель процессов и механизмов генерации свободных носителей заряда в области «холодного» катода сварочной дуги. Поэтому в работе рассматривается катодная область дуги.

Рассмотрим значение некоторых терминов, встречающихся в литературе.

«Дуга в газе» означает, что электрический разряд горит между неплавящимися электродами в атмосфере како-

го-либо газа. При плавлении и испарении электродов дуга горит в их парах и называется «дуга в парах». Дуга может гореть в парах как легкоплавких, так и тугоплавких электродов, если они нагреты до температуры плавления. При электродуговой сварке используются «дуга в газе», «дуга в парах» и их комбинация.

Если термоэлектронная эмиссия из катода, нагретого до температуры плавления, обеспечивает разрядный ток до нескольких тысяч ампер, то в этом случае катод называется «горячим» (например, W, C). Если же при нагревании катода вплоть до температуры плавления термоэлектронная эмиссия

не обеспечивает указанного тока, то такой катод называется «холодным». Например, при температуре плавления «холодного» стального катода плотность тока термоэлектронной эмиссии составляет лишь 5 %...10 % от тока сварочного режима.

Таким образом, в случае сварочной дуги термины «холодный» и «горячий» в первую очередь характеризуют максимальный ток термоэлектронной эмиссии из рассматриваемого катода.

Характерной особенностью сварочной дуги являются очень большие токи ( $\sim 10^3$  А/см<sup>2</sup>) и относительно небольшие напряжения (от 8 до 25 В). Согласно современным представлениям в катодной области разрядный ток имеет электронную и ионную составляющие, при этом свободные ионы возникают в основном при ионизации молекул газа.

В связи с этим возникает вопрос: что является источником электронов, газ или катод, и каковы механизмы генерации свободных электронов и ионизации молекул газа в катодной области?

В случае «горячих» катодов ответ известен: катод является источником первичных электронов, которые возникают вследствие термоэлектронной эмиссии и, ускоряясь в поле катодного падения потенциала, ионизируют молекулы газа.

Основное затруднение теории сварочной дуги связано с объяснением большого электронного тока порядка  $10^3$  А/см<sup>2</sup> в случае «холодных» катодов. Как было отмечено выше, плотность тока термоэлектронной эмиссии из стального катода на порядок меньше наблюдаемого на практике сварочного тока. Мнения исследователей расходятся при выборе источника свободных электронов и механизма ионизации газа. Начиная с 20-х гг. прошлого века, при разработке теории сварочной дуги возникли два направления. В одних теориях в качестве источника свободных заряженных частиц выбран газ, и его ионизация происходит за счет тепловой

энергии частиц (термическая ионизация). В других теориях источником свободных электронов является металл (катод) и ионизация газа происходит за счет энергии электрического поля (ударная ионизация). Следует отметить неудачность термина «ударная», т. к. в обоих рассмотренных случаях ионизация происходит в результате столкновения частиц с достаточно высокими энергиями. Отличие между двумя механизмами ионизации заключается в природе энергии, за счет которой частицы ускоряются. Здесь возникает вопрос об отождествлении энергии теплового движения с энергией, приобретенной в электрическом поле.

В 1926 г. автором [1] в основу созданной им теории был положен механизм генерации свободных электронов и ионов, основанный на термической ионизации. В этом случае источником свободных электронов выбран газ. Автор предполагал существование, на расстоянии 1–10 свободных пробегов от катода, некоторой ионизационной области с высокой температурой, достаточной для термической ионизации молекул газа (пара). В предлагаемой модели ионы из ионизационной области двигаются к катоду и бомбардируют его, а электроны – к аноду, ионизируя газ в анодном столбе.

Кажущаяся простота подхода заключается в одновременном возникновении свободных иона и электрона в объеме газа вне зависимости от наличия катода. Плотность разрядного тока определяется степенью ионизации газа, которая вычисляется известной формулой Сага [1]. В этом случае разрядный ток в катодной области обусловлен только ионной компонентой. По мнению некоторых авторов [2] предложенная модель и созданная на ее основе теория объясняет большинство наблюдаемых свойств сварочной дуги.

Вместе с тем приведенная теория вызвала обоснованные возражения некоторых авторов [3–7]. Одним из недостат-

ков этой теории считается то, что в ней исключается роль катода в генерации свободных зарядов. В то же время и сегодня можно встретить работы сторонников теории термической ионизации.

Целью работы является попытка получить обобщенную модель элементарных процессов в области «холодного» катода сварочной дуги в парах при атмосферном давлении.

Для достижения этой цели необходимо выбрать источник свободных электронов (газ или катод) и обобщить экспериментально подтвержденные представления о механизмах генерации свободных носителей заряда в катодной области.

### **Эмиссия электронов из холодного катода**

Для объяснения электронной эмиссии из «холодных» катодов был

$$j = 120,4 \cdot T^2 \cdot \exp \left[ -1,16 \cdot 10^4 \cdot \left( \frac{\varphi_{\text{вых}} - 3,8 \cdot 10^{-4} \cdot (E)^{1/2}}{T} \right) \right], \quad (2)$$

где  $T$  – абсолютная температура;  $\varphi_{\text{вых}}$  – работа выхода электрона из катода, эВ;  $E$  – напряженность электрического поля у катода, В/см.

На рис. 1 приведены графики зависимости плотности тока от напряженности электрического поля у стального катода при температурах  $T_1 = 2000$  К и  $T_2 = 3000$  К. Этот интервал температур охватывает температуры плавления большинства материалов, применяемых при дуговой сварке плавлением.

Из рис. 1 видно, что при максимальных значениях температуры  $T = 3000$  К и напряженности  $E = 2 \cdot 10^5$  В/см плотность тока может достигать значения  $130$  А/см<sup>2</sup>. Это примерно в 20 раз меньше требуемого сварочного тока. Следует отметить, что теория эффекта Шотки применима при напряженностях поля

привлечен эффект Шотки, который заключается в снижении работы выхода электрона из катода при наличии у его поверхности внешнего электрического поля. Расчеты Шотки в рамках классических представлений показали, что при наличии у катода внешнего электрического поля с напряженностью  $E$ , В/см, работа выхода должна уменьшаться на величину  $\Delta A = e^{3/2} \cdot E^{1/2}$ , где  $e$  – заряд электрона. В этом случае плотность тока насыщения определяется следующим выражением [3]:

$$j = 120,4 \cdot T^2 \cdot \exp \left( -\frac{e \cdot \varphi_{\text{вых}} - e^{3/2} \cdot E^{1/2}}{k \cdot T} \right). \quad (1)$$

После подстановки постоянных значений формула (1) в системе СИ принимает следующий вид:

меньше  $10^6$  В/см. При более высоких напряженностях поля значительную роль начинает играть автоэлектронная эмиссия, связанная с туннельным эффектом. Плотность тока автоэлектронной эмиссии описывается формулой Фаулера – Нордгейма [8], полученной в 1928 г. на основе квантовой статистики Ферми – Дирака. По указанной формуле реально заметные токи можно получить при напряженностях поля у катода порядка  $10^6$  В/см и выше.

Результаты расчетов показали, что с учетом эффекта Шотки и автоэлектронной эмиссии приемлемых значений плотности дугового тока можно достичь при неоправданно больших напряженностях электрического поля. Кроме того, в формулу Фаулера – Нордгейма температура не входит. Точнее формула

записана для  $T = 0$  К. То есть рассматриваемая формула не отражает динами-

ку температурно-зависимых процессов.

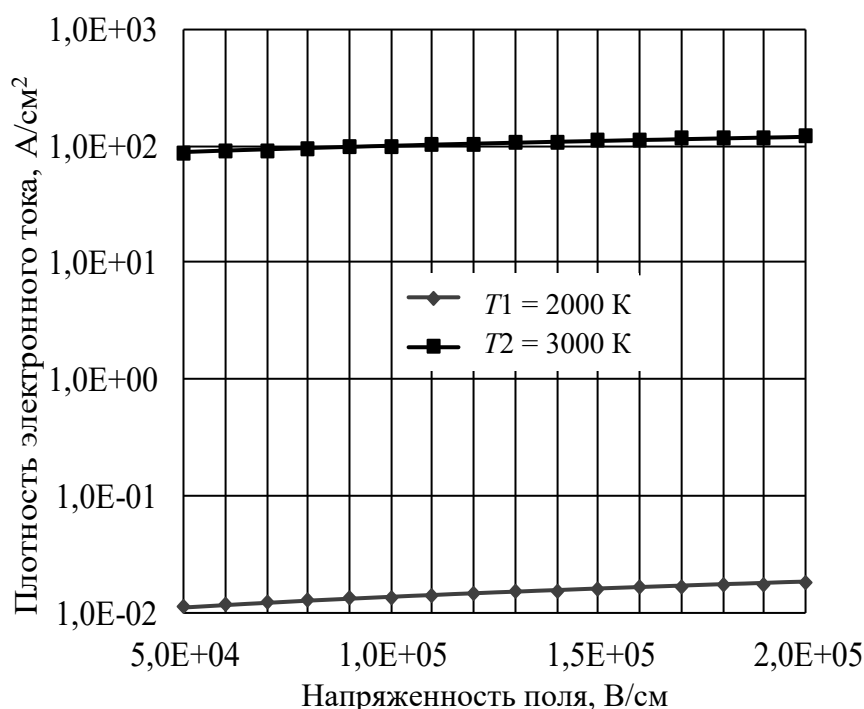


Рис. 1. Зависимость плотности тока от напряженности электрического поля у стального катода при температурах  $T_1 = 2000$  К и  $T_2 = 3000$  К

Заслуживает внимание выражение для плотности электронного тока термоавтоэлектронной эмиссии, приведенное в [3] и полученное в предположении, что при температурах выше 1000 К «нагревание катода равносильно увеличению напряженности электрического поля»:

$$j = A \cdot (T + c \cdot E)^2 \cdot \exp\left(-\frac{e \cdot \Phi_{\text{вых}}}{k \cdot (T + c \cdot E)}\right), \quad (3)$$

где  $j$  – плотность тока, А/см<sup>2</sup>;  $A$  – посто-

янная,  $A = 60,2$  А/см<sup>2</sup>;  $T$  – абсолютная температура, К;  $c$  – постоянная, для железа  $c = 10^{-2}$ ;  $E$  – напряженность электрического поля, В/см;  $e$  – заряд электрона;  $\Phi_{\text{вых}}$  – работа выхода электрона, эВ;  $k$  – постоянная Больцмана.

Выражение (3) хорошо согласуется с экспериментально установленным фактом увеличения плотности тока с ростом плотности газа или пара у поверхности катода. С учетом значений постоянных величин формула (3) принимает следующий вид:

$$j = 60,2 \cdot (T + 10^{-2} \cdot E)^2 \cdot \exp\left(-1,16 \cdot 10^4 \cdot \frac{\Phi_{\text{вых}}}{(T + 10^{-2} \cdot E)}\right). \quad (4)$$

Согласно [3], выражение (3) может быть получено на основе квантово-

механических представлений. По сравнению с формулой Фаулера – Нордгей-

ма выражение (3) в явном виде содержит температуру катода.

Для расчетов по формуле (4) необходимо выбрать экспериментально обоснованный механизм возникновения сильного электрического поля у катода. В литературе указанное поле связывают либо с полем отдельного иона, подлетающего к катоду, или микронеровностями на поверхности последнего, либо с пространственными зарядами.

### ***Источник свободных электронов и механизм их генерации***

У автора теории дуги, основанной на термической ионизации газа [1], достаточно хорошо изученная область тлеющего свечения заменена гипотетическим ионизационным пространством. Существование названного пространства (термической ионизации) требует выполнения условия равновесности газа, отвечающего принципу детального равновесия. Газовый разряд может быть стационарным, однако не является равновесным, особенно в катодной области. Поскольку существование ионизационного пространства не имеет ни строгого теоретического, ни экспериментального подтверждения, то мы не будем его рассматривать.

Экспериментально установленным [3, 4] является факт перехода тлеющего разряда в дугу при уменьшении внешнего сопротивления электрической цепи. Такой переход свидетельствует о том, что в тлеющем разряде присутствуют все процессы, необходимые для зажигания дуги. В тлеющем разряде генерация свободных носителей заряда в катодной области происходит за счет двух механизмов: эмиссии электронов из катода и ионизации газа этими электронами в области тлеющего свечения. Более вероятно, что в дуге реализуются те же, но многократно усиленные механизмы.

Таким образом, в тлеющем разряде источником свободных электронов

является катод, и это неудивительно. Металлический катод представляет собой почти неограниченный источник электронов ( $n = 10^{28} \text{ м}^{-3}$ ) по сравнению с газом. Такое количество электронов газ (пар) мог бы обеспечить при давлении  $p \approx 10^{28} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 2 \cdot 10^3 \approx 3 \cdot 10^3 \text{ атм}$  над расплавленным металлом. Это значение существенно превышает опытные данные.

Кроме того, эмиссия электронов из катода является энергетически более выгодным механизмом по сравнению с ионизацией, т. к. энергия выхода металлов меньше энергии ионизации молекул.

Таким образом, выбор катода в качестве источника свободных электронов в катодной области дуги является более обоснованным по сравнению с термической ионизацией.

В теории катодной области тлеющего разряда ионизация газа в области тлеющего свечения происходит за счет энергии, которую электроны, эмитированные из катода, приобретают в электрическом поле. Следовательно, в катодной области дуги ионизация молекул также происходит за счет энергии электрического поля. В данном случае не требуется выполнения условия равновесности системы, необходимым и достаточным является условие стационарности.

### ***Возникновение поля объемного заряда и автоэлектронная эмиссия из «холодного» катода***

В начале 30-х гг. прошлого столетия в [9] был предложен автоэлектронный механизм перехода тлеющего разряда в дуговой. По представлениям автора в аномальном тлеющем разряде отдельные участки поверхности катода под влиянием сильного поля способны эмитировать электроны. При этом плотность электронного тока достаточна для заметной ионизации газа в катодной области. Это приводит к повышению кон-

центрации свободных носителей с разноименными зарядами в области активных участков катода. Вследствие большей подвижности электроны быстрее ионов покидают названные участки, что приводит к увеличению плотности положительного объемного заряда, напряженности поля и усилению автоэлектронной эмиссии. В результате реализуется взаимное усиление электронной эмиссии и объемного заряда.

Автор [9], предполагая известные значения катодного падения и плотностей электронного и ионного токов, получил выражение для напряженности поля объемного заряда у поверхности катода. Для случая, когда все катодное падение реализуется на одной длине свободного пробега иона, формула, полученная автором в системе СГС, имеет следующий вид:

$$E^2 = \frac{16 \cdot \pi}{\sqrt{2} \cdot e} \cdot (j_+ \cdot \sqrt{m_+} - j_e \cdot \sqrt{m_e}) \cdot \sqrt{U_K}, \quad (5)$$

где  $E$  – напряженность электрического поля, В/см;  $e$  – заряд электрона;  $U_K$  – падение потенциала на длине свободного пробега (катодное падение);  $m_+$ ,  $m_e$  – массы покоя иона и электрона соответственно;  $j_+$ ,  $j_e$  – плотности ионного и электронного токов соответственно, А/см<sup>2</sup>.

Вынеся в формуле (5) массу электрона за скобки, массу иона, выразив через относительную атомную массу  $A$  и атомную единицу массы, и, объединив комбинацию постоянных величин в одну постоянную, получим следующее выражение:

$$E^2 = C \cdot (j_+ \cdot 42,7 \cdot \sqrt{A} - j_e) \cdot \sqrt{U_K}, \quad (6)$$

где  $C$  – постоянная,  $C = 16 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m_e}{2 \cdot e}}$ .

Из выражения (6) следует, что напряженность поля зависит как от катодного напряжения, так и от массы

иона и соотношения между ионным и электронным токами. Причем напряженность поля растет с увеличением как ионного тока, так и массы атома (в рассматриваемом случае атома катода).

В формуле (6) вынесем плотность тока за скобки и оценим вклад электронного и ионного токов в напряженность поля. В большинстве литературных источников отношение электронной и ионной компонент разрядного тока в катодной области лежит в пределах от 2 до 10. Выбрав в качестве катода алюминиевый электрод ( $A = 27$ ), получим, что с точностью 1 %...2 % электронным током в выражении (6) можно пренебречь. При этом рассматриваемая погрешность будет уменьшаться при переходе к более тяжелым металлам.

С учетом последнего формула для напряженности электрического поля пространственного заряда в катодной области в международной системе единиц примет следующий вид:

$$E = 5,7 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{j_+} \cdot \sqrt[4]{A \cdot U_K}. \quad (7)$$

Таким образом, напряженность электрического поля пространственного заряда в катодной области в большей степени определяется ионным током.

В [10] при исследовании перехода тлеющего разряда в дугу в воздухе при давлениях 50...1300 мм рт. ст. было установлено существование одной и той же при всех давлениях критической напряженности поля  $10^6$  В/см, при которой происходит указанный переход. Это можно считать опытным подтверждением рассматриваемого механизма. К опытному подтверждению модели также можно отнести факт существования порогового значения тока, при котором тлеющий разряд переходит в дугу, установленный в [11–13]. При этом для металлов с высокой температурой кипения пороговый ток оказывается в общем больше, чем для металлов с низкой температурой. Кроме того, при большей

плотности среды для рассматриваемого перехода требуются более низкие значения тока. Отметим, что указанные работы проводились до 1940 г. Из последних обзорных работ, посвященных электрической дуге, можно отметить [14].

**Обобщенная модель элементарных процессов в области «холодного» катода сварочной дуги при атмосферном давлении**

На основании приведенных данных можно предложить следующую обобщенную модель процессов в области холодного катода сварочной дуги в парах при атмосферном давлении.

Механизмы генерации свободных носителей и возникновения области ионизации заключаются в следующем.

Электроны, вылетевшие из катода, пролетают без столкновений расстояние, равное длине свободного пробега  $\lambda$  ( $\lambda \approx 5 \cdot 10^{-7}$  м при давлении  $10^5$  Па). К концу свободного пробега они приобретают в электрическом поле катодного падения потенциала ( $U \approx 8 \dots 10$  В) кинетическую энергию, равную  $E_k \approx 8 \dots 10$  эВ. В конце свободного пробега электроны сталкиваются с частицами газа (пара). Если энергия ускоренного электрона равна или больше энергии ионизации частиц газа, то происходит их ионизация. В результате возникает область ионизации (тлеющего свечения). В этой области возникают свободные носители заряда – положительный ион и электрон. Точнее ион и два электрона – вылетевший из катода и вызвавший ионизацию, и возникший в результате ионизации.

Рассмотрим механизмы возникновения электрического поля пространственных зарядов и электронной эмиссии из катода.

Электрон, вызвавший ионизацию и возникший в результате ионизации, будучи легче иона, достаточно быстро

удаляется из области ионизации в сторону анода. Ионы же в момент возникновения имеют небольшую тепловую скорость, равную скорости нейтральных атомов. Поэтому на расстоянии от катода, равном длине свободного пробега электрона, возникает область, в основном заряженная положительно.

Электроны вылетают из катода с небольшой скоростью и создают слой отрицательного заряда в непосредственной близости от катода.

Таким образом, в катодной области возникают два разноименно заряженных электрических слоя, которые эмитируют свободные, разноименно заряженные носители. Так как эти слои расположены на расстоянии свободного пробега, то можно говорить о «вакуумной диоде с двумя эмиттерами». Электрическое поле положительного объемного заряда, расположенного близко к катоду, может вызвать усиление автоэлектронной эмиссии из последнего. Напряженность этого поля можно вычислить с помощью выражения (7).

Из области ионизации ионы вытягиваются электрическим полем катодного падения потенциала и бомбардируют катод, отдавая ему энергию, приобретенную в электрическом поле. Электроны же двигаются в электрическом поле из области ионизации к аноду и ионизируют газ в положительном столбе.

Увеличение плотности разрядного тока, например, уменьшением балластного сопротивления цепи, приводит к разогреву катода, увеличению плотности его паров, ионизации металлического пара, нейтрализации объемного отрицательного заряда и усилению термоавтоэлектронной эмиссии. Перечисленные процессы приводят к лавинообразному нарастанию разрядного тока, ограниченного лишь сопротивлением электрической цепи.

### Результаты моделирования и их обсуждение

Значения напряженности электрического поля у катода и плотности электронного тока можно оценить совместным решением выражений (7) и (4).

Ниже приведены результаты расчетов для стального катода. Целью расчетов является оценка пригодности выбранных выражений для описания сварочного тока. Чтобы привязать расчеты к

экспериментальным данным, начальное значение ионного тока принято меньшим критического (порогового) тока перехода от тлеющего разряда к дуговому разряду, равного  $I_{кр} \approx 14 \text{ A/cm}^2$  [11].

На рис. 2 приведен график зависимости напряженности электрического поля у стального катода от плотности ионного тока при катодном напряжении, равном  $U_k = 10 \text{ В}$  и температуре  $T = 2500 \text{ К}$ .

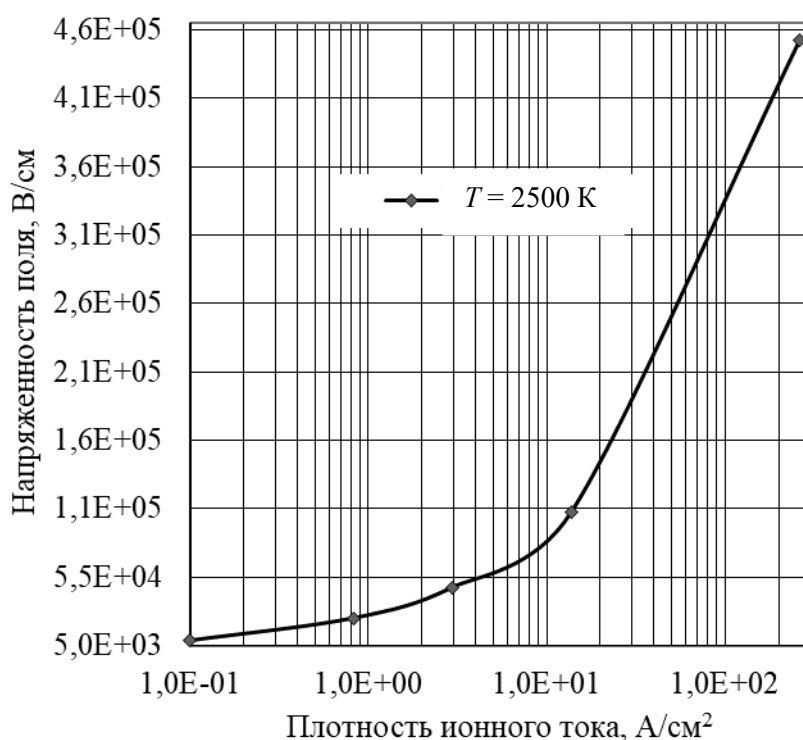


Рис. 2. Зависимость напряженности электрического поля у стального катода от плотности ионного тока при температуре  $T = 2500 \text{ К}$

Из анализа графика следует, что после достижения током критического значения  $14 \text{ A/cm}^2$  наблюдается лавинообразное нарастание напряженности поля и ионного тока.

Значения напряженности поля по порядку величины совпадают со значением, вычисленным для случая, когда катодное падение потенциала сосредоточено на расстоянии, равном длине свободного пробега  $\lambda$ :

$$E_k = \frac{U_k}{\lambda} = \frac{10}{5 \cdot 10^{-7}} = 2 \cdot 10^7 \frac{\text{В}}{\text{м}} = 2 \cdot 10^5 \frac{\text{В}}{\text{см}}.$$

На рис. 3 приведен график зависимости плотности тока термоавтоэлектронной эмиссии из стального катода от плотности ионного тока при температуре  $T = 2500 \text{ К}$ .

Из рис. 3 следует, что при значениях ионного тока, превышающих указанное выше критическое значение, наблю-



дается лавинообразное нарастание разрядного тока вплоть до  $10^6$  А/см<sup>2</sup>. Это соответствует опыту. Поэтому можно считать, что совместное решение выражений (7) и (4) для описания тока сварочной дуги является вполне приемлемым. Для получения более корректных результатов при расчетах следует учи-

тывать наличие ограничений, определяемых технологическими требованиями сварки. Дальнейшая работа должна состоять в проверке рассмотренной обобщенной модели процессов в катодной области сварочной дуги на соответствие балансу энергии и получении самосогласованной системы уравнений.

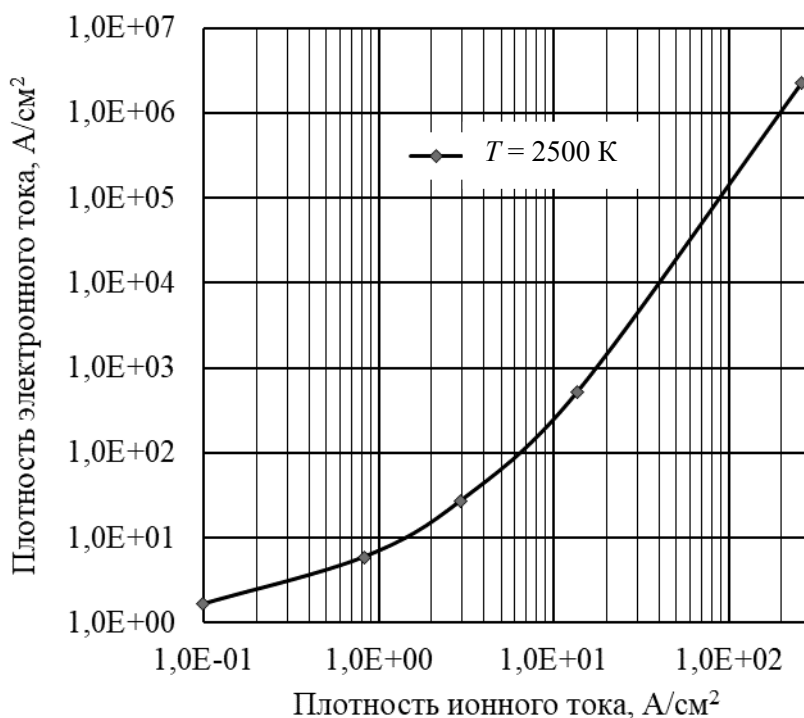


Рис. 3. Зависимость плотности тока термоавтоэлектронной эмиссии из стального катода от плотности ионного тока при температуре  $T = 2500$  К

### Заклучение

1. На основе известных экспериментальных данных рассмотрена обобщенная модель элементарных процессов в области «холодного» катода сварочной дуги при атмосферном давлении. Обобщенная модель базируется на следующих представлениях: источником свободных электронов является металлический катод сварочной дуги; электроны покидают «холодный» катод в результа-

те действия электрического поля пространственных зарядов и нагрева; генерация свободных носителей заряда в газе происходит в результате ионизации за счет энергии электрического поля.

2. Обобщенная модель может объяснить большие значения разрядного тока в случае «холодных» катодов. Результаты оценочных расчетов тока дуги со стальным катодом при температуре  $T = 2500$  К близки к известным опытным данным.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Slepian, J.** Theory of current transference at the cathode of an Arc / J. Slepian // Phys. Rev. – APS. – 1926. – № 27. – P. 249.
2. **Лесков, Г. И.** Электрическая сварочная дуга / Г. И. Лесков. – Москва: Машиностроение, 1970. – 336 с.
3. **Энгель, А.** Физика и техника электрического разряда в газах: в 2 т. / А. Энгель, М. Штенбек. – Москва: ОНТИ, 1935. – Т. 1. – 252 с.
4. **Кесаев, И. К.** Катодные процессы электрической дуги / И. К. Кесаев. – Москва: Наука, 1968. – 244 с.
5. **Грановский, В. Л.** Электрический ток в газе. Установившийся ток / В. Л. Грановский. – Москва: Наука, 1971. – 526 с.
6. **Райзер, Ю. П.** Физика газового разряда / Ю. П. Райзер. – Долгопрудный: Интеллект, 2009. – 736 с.
7. **Ляпин, А. И.** О термической ионизации и температуре сварочной дуги / А. И. Ляпин // Актуальные вопросы и передовые технологии сварки в науке и промышленности: сб. ст. I Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2022. – С. 140.
8. **Fowler, R. H.** Electron emission in intense electric fields / R. H. Fowler, L. W. Nordheim // Proc. Roy. Soc. – London, 1928. – Vol. 119. – P. 173–181.
9. **Mackeown, S. S.** Cathode drop in arc discharges / S. S. Mackeown // Electrical Engineering. – A. I. E. E. – 1932. – Vol. 51, № 6. – P. 386–388.
10. **Boyle, W. S.** Glow-to-Arc Transition / W. S. Boyle, F. E. Haworth // Phys. Rev. – APS. – 1956. – Vol. 101, № 3. – P. 935–938.
11. **Mackeown, S. S.** Reignition of an arc at low pressures / S. S. Mackeown, J. D. Cobine, F. W. Bowden // Electrical Engineering. – A. I. E. E. – 1934. – Vol. 53, № 7. – P. 1081.
12. **Plesse, H.** Untersuchungen am elektrischen Lichtbogen / H. Plesse // Annalen der Physic. – 1935. – Vol. 414, № 5. – P. 473–499.
13. **Suits, C. G.** Role of Oxidation in Arc Cathodes / C. G. Suits, J. P. Hocker // Phys. Rev. – A. P. S. – 1938. – Vol. 53. – P. 670.
14. **Makhlin, N. M.** Processes occurring at excitation of the welding arc (Review) / N. M. Makhlin // Avtomaticheskaya Svarka (Automatic Welding). – 2020. – № 9. – P. 54–60.

Статья сдана в редакцию 12 января 2024 года

Контакты:

ali\_lyapin@tut.by (Ляпин Али Ибрагимович).

**A. I. LYAPIN**

## GENERALIZED MODEL OF ELEMENTARY PROCESSES IN THE «COLD» CATHODE REGION OF A WELDING ARC IN VAPOR AT ATMOSPHERIC PRESSURE

### Abstract

A generalized model of elementary processes in the «cold» cathode region of the welding arc is based on known experimental data obtained while studying the transition from a glow discharge to an arc discharge. The ideas that form the basis of this model are as follows: the source of free electrons is the metal cathode of the welding arc; electrons leave the «cold» cathode as a result of the action of the electric field of space charges and heating; the generation of free charge carriers in the gas occurs as a result of ionization due to the energy of the electric field. It is shown that the generalized model can explain large values of the discharge current in the case of «cold» cathodes. The results of estimated calculations of the arc current with a steel cathode at a temperature of  $T = 2500$  K are close to the known experimental data.

### Keywords:

welding arc, «cold» cathode, cathode region, elementary processes, generalized model of processes.

### For citation:

Lyapin, A. I. Generalized model of elementary processes in the «cold» cathode region of a welding arc in vapor at atmospheric pressure / A. I. Lyapin // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2024. – № 1 (82). – P. 108–117.