

ФИЗИКА

DOI: 10.24412/2077-8481-2025-1-81-91

УДК 537.523.5:621.791.75

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

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

БАЛАНС ЭНЕРГИИ В КАТОДНОЙ ОБЛАСТИ И НА «ХОЛОДНОМ» КАТОДЕ СВАРОЧНОЙ ДУГИ, СВОБОДНО ГОРЯЩЕЙ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

Аннотация

Детализирована ранее рассмотренная обобщенная модель элементарных процессов в области «холодного» катода сварочной дуги, свободно горящей при атмосферном давлении. Отмечено, что при расчетах необходимо различать следующие токи: разрядный (ток дуги), ионный и электронной эмиссии i_e и i_e^n , численно равный ионному току. С учетом обобщенной модели и существующих данных получены выражения баланса энергии в катодной области и на «холодном» катоде сварочной дуги. Предложена формула для мощности, теряемой единицей площади катода в результате испарения материала электрода. На основе баланса энергии на катоде получено выражение для доли ионного тока в катодной области, которое учитывает как электрические параметры дуги и катода, так и теплофизические характеристики последнего. Численные расчеты доли ионного тока и энергетического баланса для некоторых технологически значимых материалов приводят к обнадеживающим результатам, совпадающим с существующими. Результаты подтверждают обоснованность обобщенной модели элементарных процессов в области «холодного» катода сварочной дуги.

Ключевые слова:

сварочная дуга, «холодный» катод, элементарные процессы, баланс энергии на катоде.

Для цитирования:

Ляпин, А. И. Баланс энергии в катодной области и на «холодном» катоде сварочной дуги, свободно горящей при атмосферном давлении / А. И. Ляпин // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2025. – № 1 (86). – С. 81–91.

Введение

Одним из основных критериев обоснованности той или иной модели электрической дуги является выполнение баланса энергии в катодной области [1–4]. Это следует из того, что все процессы, необходимые для возникновения и стационарного горения дуги, протекают в ее катодной области. Как указано в [2], почти у всех авторов различных теорий дуги, рассматривающих баланс энергии на катоде с учетом разных

комбинаций элементарных процессов, баланс удивительным образом сходится. Это связано с тем, что каждый автор достаточно произвольно выбирает совокупность основных, по его мнению, элементарных процессов, протекающих в области катода. При этом несовпадение рассматриваемого баланса на 10 % считается приемлемым.

Большинство работ, посвященных выводу уравнения баланса энергии на катоде дуги, относится ко второй половине XX в. Многие авторы используют

результаты, приведенные в [1]. Автор [1], не определяя тип дуги, из всех процессов, приводящих к нагреву катода, выделяет его бомбардировку ионами, ускоренными электрическим полем катодного падения потенциала U_k . Эти ионы передают катоду как кинетическую энергию eU_k , так и энергию ионизации eU_i . При этом часть энергии ионов, равная $e\phi_{вых}$, затрачивается на эмиссию электрона, нейтрализующего ион перед его столкновением с катодом. Таким образом, согласно [1], максимальное количество энергии, отдаваемое в единицу времени P ионным током катоду,

$$P = i_i \cdot (U_k + U_i - \phi_{вых}), \quad (1)$$

где i_i – ионный ток; U_i , $\phi_{вых}$ – работы ионизации атома газа и выхода электрона соответственно, эВ.

Автор [1] считает, что из процессов теплоотдачи охлаждение электронов (катода) вследствие «испарения» (эмиссии) играет гораздо более значительную роль, чем потеря тепла путем излучения или теплопередачи. Предполагая, что вся энергия, поступающая на катод, идет на электронную эмиссию, названным автором получено следующее уравнение баланса мощности на катоде:

$$i_i \cdot (U_k + U_i - \phi_{вых}) = i_e \cdot \phi_{вых}, \quad (2)$$

где i_e – ток электронной эмиссии.

Максимальное значение эмиссионного тока определяется из отношения

$$\frac{i_e}{i_i} = \frac{U_k + U_i - \phi_{вых}}{\phi_{вых}}. \quad (3)$$

Например, для дуги в парах меди отношение токов получено равным 2,5. Подобный вывод также приводится в [4]. В [3] без указания типа дуги обобщается такое же уравнение энергетического баланса в катодной области, как в [1], но уточненное введением ко-

эффициентов аккомодации кинетической и потенциальной энергий, отдаваемых ионом катоду. При этом автор «на основании некоторых аналогий и косвенных соображений» полагает, что указанные коэффициенты аккомодации могут быть приняты равными единице, и приводит пример расчета доли S электронного тока в разрядном токе, равной $S = 0,83$. Кроме того, утверждается, что учет в рассматриваемом уравнении баланса других приходных и расходных составляющих энергии (теплоперенос от столба за счет теплопроводности и радиационного теплообмена, отток энергии вглубь материала электрода за счет теплопроводности, потери энергии за счет радиации) не изменяет порядок вышеприведенной величины. В [2] рассматривается баланс энергии на катоде сильноточной дуги. Автор [2] выражения для кинетической и потенциальной энергий ионов также уточняет введением коэффициентов аккомодации. Кроме того, отмечается возможность дополнительного нагрева катода за счет энергии, выделяющейся при конденсации нейтрализованного иона. Вместе с тем в приводимом балансе энергии конденсация не учитывается. При составлении уравнения энергетического баланса на катоде автор во многом повторяет результаты, приведенные в [5]. В качестве приходных составляющих в [2] учитываются кинетическая и потенциальная энергии ионов, бомбардирующих катод, и энергия, поступающая из положительного столба дуги. Потери энергии связываются с эмиссионным охлаждением, испарением материала электрода и теплопередачей вглубь электрода. Полагая все коэффициенты аккомодации равными единице, автор отмечает, что в некоторых случаях даже такие грубые оценки позволяют получить хорошее совпадение с экспериментом. Следует отметить, что баланс энергии, приведенный в [2], ближе к балансу на катоде, поскольку учитывает испарение материала электрода.

Отношение (3) электронной и ионной составляющих на катоде, тиражированное другими авторами, получено в предположении, что эмиссия электронов из катода происходит за счет энергии ионов, ускоренных полем катодного падения потенциала и бомбардирующих катод. Поскольку сам автор выражения (3) полагает, что энергия ионного тока идет на нагрев катода, это предполагает термоэлектронную эмиссию (ТЭЭ) электронов из «горячего» катода. Если в случае «горячих» катодов ионная бомбардировка может привести к возникновению ТЭЭ, то на «холодных» катодах этот механизм недостаточен. Кинетическая и потенциальная вторичная ионно-электронная эмиссии также не могут обеспечить достаточного эмиссионного тока из «холодных» катодов [7]. Вместе с тем выражение (3) впоследствии стало применяться другими авторами к различным типам электрической дуги, что затрудняет понимание вопроса. Таким образом, выражение (3) должно быть отнесено к «горячим» катодам.

Наиболее близкой к данной статье по содержанию является работа [6], которая посвящена именно сварочной дуге. Автор [6] сумму мощностей, выделяющихся в катодной и анодной областях и в положительном столбе, приравнивает мощности дуги и после преобразований получает выражение, «представляющее, по существу, баланс энергии катода»,

$$U_k = f \cdot (U_k + U_i) + (1 - f) \cdot U_k \cdot \varepsilon_e, \quad (4)$$

где f , $(1 - f)$ – доли ионного и электронного токов в токе дуги; ε_e – доля кинетической энергии, передаваемой электронами в катодной области (без указания «получателя» этой энергии).

По существу, (4) относится к катодной области. Баланс энергии именно

на катоде в [6] получен позже, с учетом мощностей, идущих на плавление и испарение материала катода:

$$i_d \cdot f \cdot (U_k + U_i) - i_d \cdot \Phi_{вых} = P_{пл} + P_{исп}, \quad (5)$$

где i_d – ток дуги; $P_{пл}$, $P_{исп}$ – мощности, затрачиваемые на плавление и испарение соответственно.

То есть в балансе энергии на катоде потери за счет теплопроводности не учитываются. Следует отметить, что при выводе (4) была допущена неточность. Более точным является выражение

$$U_k = f \cdot (U_k + U_i) + (1 - f) \times \\ \times U_k \cdot \varepsilon_e + (1 - f) \cdot \Phi_{вых}. \quad (6)$$

Целью работы является получение уравнений баланса энергии с учетом основных элементарных процессов в катодной области и на «холодном» катоде сварочной дуги, свободно горящей при атмосферном давлении.

Баланс энергии с учетом элементарных процессов в катодной области

В выражениях (1)–(3) i_i и i_e – это ионный и электронный токи соответственно. Причем i_i в первом приближении – это ионный ток, возникающий за счет ионизации пара в области положительного объемного заряда, а i_e – ток электронной эмиссии из катода, который вместе с ионным током образует разрядный ток (ток дуги) в катодной области. Следовательно, выражение (2) описывает баланс мощности не на катоде, а в катодной области. Также следует отметить некоторую неточность в выражении (2). Действительно, преобразуем (2) к следующему виду:

$$i_i \cdot (U_k + U_i) = (i_e + i_i) \cdot \Phi_{вых}. \quad (7)$$

Хотя в правой части (7) в скобках стоит ионный ток, в действительности это равный ему по значению ток электронов, вылетающих из катода и нейтрализующих подлетающие ионы, т. е. $i_i = i_e^n$. Тогда (7) принимает вид

$$i_i \cdot (U_k + U_i) = (i_e + i_e^n) \cdot \Phi_{\text{выл}}. \quad (8)$$

«Электронный ток нейтрализации» i_e^n , так же как и i_e , будучи током эмиссии, отличается от него тем, что он является составной частью разрядного тока во внешней цепи со стороны катода. В то время как i_e входит в состав разрядного тока как в разрядном промежутке, так и во внешней цепи со стороны катода. Так как сумма рассматриваемых электронных токов дает ток дуги во внешней цепи со стороны катода, то (8) приводит к следующему выражению для доли ионного тока:

$$\frac{i_i}{i_{\partial}} = \frac{\Phi_{\text{выл}}}{U_k + U_i}. \quad (9)$$

Поскольку ток i_e^n численно равен ионному току, то выражения (2) и (8) приводят к одинаковому значению доли ионного тока в токе дуги. В частности, для железного электрода доля ионного тока составляет 0,24. Приведенное значение является заниженным, т. к. не учитывает все процессы на катоде. Учет плавления и испарения электродов должен дать большее значение доли ионного тока.

Следует отметить, что выражения (2) и (8), включая в себя ионный ток, не отражают механизм генерации ионов. Согласно обобщенной модели элементарных процессов, рассмотренной в [8], ионы возникают в результате ионизации пара электронами, эмитированными из катода и получившими энергию на длине свободного пробега в области катодного падения потенциа-

ла U_k . В качестве указанной энергии можно рассматривать второе слагаемое в правой части равенства (6), которое предполагает, что этой энергии достаточно для ионизации пара. В этом случае справедливо следующее равенство:

$$(1 - f) \cdot U_k \cdot \varepsilon_e = f \cdot U_i. \quad (10)$$

С учетом (10), формулу (6) можно записать в виде

$$U_k = f \cdot (U_k + U_i) + f \cdot U_i + (1 - f) \cdot \Phi_{\text{выл}}. \quad (11)$$

В такой редакции катодное напряжение обеспечивает нагрев катода ионным током, ионизацию пара ускоренными электронами и компенсирует эмиссионное охлаждение катода.

Из выражения (11) можно получить следующие формулы:

– для катодного напряжения

$$U_k = \frac{2 \cdot f}{1 - f} \cdot U_i + \Phi_{\text{выл}}; \quad (12)$$

– для доли ионного тока в токе дуги

$$f = \frac{U_k - \Phi_{\text{выл}}}{U_k + 2 \cdot U_i - \Phi_{\text{выл}}}. \quad (13)$$

Выражение (12) позволяет определить значение катодного напряжения при заданных доле ионного тока и материале катода. Например, катодное напряжение в случае стального катода ($U_i = 7,85$ эВ, $\Phi_{\text{выл}} = 4,31$ эВ) при $f = 0,4$ равно $U_k \approx 14,8$ В. Полученное значение очень близко к наблюдаемому на практике. Однако формулы (12) и (13) для катодного напряжения и доли ионного тока также не соответствуют балансу энергии на «холодном» катоде и доля ионного тока должна быть больше.

**Баланс энергии (мощности)
на «холодном» катоде сварочной дуги,
свободно горящей при атмосферном
давлении**

В соответствии с обобщенной моделью элементарных процессов в области «холодного» катода сварочной дуги [8], электрон, вылетевший из катода за счет термоавтоэлектронной эмиссии, приобретает в поле катодного падения потенциала энергию, достаточную для ионизации атомов пара. В результате ионизации на расстоянии от катода, равном длине свободного пробега, кроме исходного электрона, рождаются еще один электрон и положительный ион. То есть в итоге в этой области появляются три свободных носителя заряда: положительный ион и два электрона – вызвавший ионизацию и возникший при ионизации. Электроны двигаются к аноду через положительный столб, производя в нем ионизацию пара для поддержания достаточной проводимости и обеспечивая разрядный ток. Ион, ускоряясь катодным падением потенциала, бомбардирует катод, отдавая ему энергию, полученную от электрического поля, и конденсируется. Если каждый электрон, эмитированный катодом, ионизирует хотя бы один атом пара, то разрядный ток за счет электрона, возникшего при ионизации, должен быть равен удвоенному току электронной эмиссии. В катодной области ток равен сумме ионного и электронного токов. Эта сумма также должна равняться удвоенному току электронной эмиссии из катода. Следовательно, в катодной области ионный ток должен составлять половину тока дуги. То есть соотношение ионного и электронного токов в области «холодного» катода сварочной дуги при атмосферном давлении должно быть равно единице. Этот вывод согласуется с результатами, приведенными в [5], где получено, что в катодной области силовоточной дуги с

«холодным» катодом ионы переносят до 50 % полного тока.

Таким образом, во внешней цепи со стороны анода ток дуги должен быть равен удвоенному току электронной эмиссии из катода. В катодной области ток дуги равен сумме электронного и ионного токов. Очевидно, что во внешней цепи со стороны катода ток дуги также должен быть равен удвоенному току электронной эмиссии. Действительно, непосредственно перед столкновением с катодом ион нейтрализуется дополнительным электроном, вылетающим из катода. Этот электрон не участвует в токе в разрядном промежутке, но обеспечивает разрядный ток во внешней цепи со стороны катода. Следовательно, в стационарном режиме во внешней цепи как со стороны катода, так и со стороны анода значение плотности разрядного тока должно быть равным удвоенному значению плотности тока электронной эмиссии из катода. Таким образом, при различных расчетах следует различать токи: разрядный (ток дуги), ионный и электронной эмиссии i_e и i_e^n , который численно равен ионному току. Следует отметить, что обобщенная модель генерации свободных носителей заряда и формирования разрядного тока в области «холодного» катода сварочной дуги объясняет равенство токов в разрядном промежутке и во внешней цепи на основе известных элементарных процессов.

С учетом существующих уравнений баланса энергии на катоде и выше-рассмотренных элементарных процессов получим выражение для мощности, поступающей на катод. Одним из основных источников энергии является ионный ток [1, 2, 8]. Ионы, бомбардируя катод, отдают ему кинетическую энергию, полученную от электрического поля. Мощность, передаваемая ионным током единице площади катода, равна произведению катодного падения потенциала U_k , плотности тока j_i и ко-

эфициента аккомодации иона α_i . Поскольку измеряемой величиной является ток дуги j_d (разрядный ток), то ионный и электронный токи будем выражать через их доли f и $(1 - f)$ в токе дуги:

$$P_{кин} = U_k \cdot f \cdot j_d \cdot \alpha_i. \quad (14)$$

Непосредственно перед столкновением ионы нейтрализуются и отдают катоду энергию нейтрализации. Плотность потока этой энергии определяется потенциалом ионизации U_i атомов пара, плотностью ионного тока j_i и коэффициентом аккомодации α_0 нейтрального атома:

$$P_{ном} = U_i \cdot f \cdot j_d \cdot \alpha_0. \quad (15)$$

Сложив приходные составляющие мощности (14) и (15), получим в первом приближении выражение для полной мощности, выделяющейся на единице площади «холодного» катода дуги,

$$P_{приход} = f \cdot j_d \cdot (U_k \cdot \alpha_i + U_i \cdot \alpha_0). \quad (16)$$

По мнению практически всех авторов, основная доля потерь энергии катодом электрической дуги приходится на эмиссионное охлаждение (калориметрический эффект). Термоэлектронная эмиссия сопровождается потерей энергии, равной $E_{ТЭЭ} = e\varphi_{вых}$ на каждый эмитированный электрон. При термоавтоэлектронной эмиссии (ТАЭЭ) большая часть электронов эмитируется с уровней, расположенных выше уровня Ферми. В этом случае средняя энергия $E_{ТАЭЭ}$, уносимая из катода отдельным электроном, может быть оценена следующим выражением [5]:

$$E_{ТАЭЭ} = e \cdot (E_e - E_F), \quad (17)$$

где E_e – средняя энергия эмитированного электрона, эВ; E_F – энергия Ферми, эВ.

Мощность, уносимую с единицы площади катода электронным током,

получим, умножив разность $(E_e - E_F)$ в выражении (17) на плотность тока электронной эмиссии j_e :

$$P_{ТАЭЭ} = (E_e - E_F) \cdot j_e. \quad (18)$$

Расчеты показывают [5], что $E_{ТАЭЭ}$ меньше термоэлектронной работы выхода.

Выражение (18) учитывает электроны, которые, вылетая из катода, в дальнейшем ионизируют молекулы пара и могут обеспечивать ток как в разрядном промежутке, так и во внешней цепи. Кроме таких электронов, следует также учитывать те, которые вылетают из катода и нейтрализуют положительные ионы, бомбардирующие катод. Эти электроны не участвуют в электропроводности в разрядном промежутке, но «охлаждают» катод. Мощность, уносимую с единицы площади катода указанными электронами, можно в первом приближении оценить выражением (18), подставив в него плотность ионного тока вместо j_e :

$$P_{нейтр} = (E_e - E_F) \cdot j_i. \quad (19)$$

Таким образом, калориметрический эффект $P_{калорим}$ (эмиссионное охлаждение) определится суммой мощностей $P_{ТАЭЭ}$ и $P_{нейтр}$:

$$P_{калорим} = (E_e - E_F) \cdot j_d. \quad (20)$$

Известно, что эмиссионное охлаждение (калориметрический эффект) возникает и регистрируется в случае термоэлектронной эмиссии, т. е. эффект связан с быстрыми термоэлектронами. В [7] приведены экспериментальные данные, которые свидетельствуют об отсутствии калориметрического эффекта в случае автоэлектронной эмиссии. В опытах было получено, что даже при температуре катода $T = 1550$ К и напряженности электрического поля $E = 10^8$ В/см калориметрический эффект составляет $2,5 \cdot 10^{-3}$ эВ на электрон, что

лежит ниже чувствительности опыта. Поэтому можно утверждать, что эмиссионное охлаждение катода электрической дуги (калориметрический эффект) должно быть отнесено к дугам с «горячим» катодом. Поэтому, согласно данным большинства авторов, в первом приближении учитывается максимальное значение калориметрического эффекта:

$$P_{\text{калорим}} = (E_e - E_F) \cdot j_d = \Phi_{\text{вых}} \cdot j_d. \quad (21)$$

Очевидно, что равенство (21) может дать завышенные значения эмиссионного охлаждения. Значительная часть тепловой энергии катода сварочной дуги затрачивается на его испарение и плавление [3, 4, 6]. Здесь можно привести выражение [9] для усредненной мощности, затрачиваемой на испарение в расчете на 1 А тока,

$$P_{\text{исп}} = 0,1 \cdot k_{\text{пл}} \times \frac{9,4 \cdot 10^4 \cdot T_{\text{исп}} + 9,65 \cdot 10^7 \cdot U_i - g_k}{\mu}, \quad (22)$$

где $k_{\text{пл}}$ – коэффициент плавления электрода, кг/(А·с); $T_{\text{исп}}$ – температура испарения; U_i – потенциал ионизации атома пара; g_k – энтальпия жидкого металла при температуре кипения; μ – масса киломоля материала катода.

В (22), кроме U_i и μ , к относительно точно измеряемым величинам можно отнести только коэффициент плавления $k_{\text{пл}}$. Кроме того, здесь мощность испарения выражается через мощность плавления. Иными словами, формула (22) является слишком грубой для расчетов. В то же время мощность, теряемую единицей площади катода за счет испарения, можно определить, умножив скорость испарения на теплоту испарения одного атома. Согласно [8], ионный ток в катодной области возникает в результате испарения материала

электродов и последующей ионизации пара электронами. Поэтому для стационарного горения дуги плотность потока испаряющихся атомов электродов должна, по меньшей мере, быть равной плотности потока ионов на катод. Тогда энергия, уносимая испаряющимися атомами в единицу времени с единицы площади катода, будет равна произведению плотности потока ионов и теплоты испарения одного атома:

$$P_{\text{исп}} = \frac{f \cdot j_d}{e} \cdot \lambda_{\text{исп}K}, \quad (23)$$

где f – доля ионного тока в токе дуги j_d ; e – заряд электрона; $\lambda_{\text{исп}K}$ – теплота испарения, отнесенная к одному атому катода.

Отметим, что значение мощности испарения, рассчитанной по формуле (22), умноженной на плотность тока, в 2 раза превышает значение, полученное по формуле (23).

Мощность, расходуемая на плавление электрода, определяется известным выражением [6]

$$P_{\text{пл}} = k_{\text{пл}} \cdot g_T \cdot j_d, \quad (24)$$

где g_T – энтальпия капле материала электрода при температуре кипения, Дж/кг; j_d – плотность тока дуги.

Хотя нагрев катода в основном происходит за счет ионной бомбардировки, в выражение (24) входит плотность тока дуги, т. к. экспериментальные значения величины $k_{\text{пл}}$ связаны именно с током дуги. В [2] указано, что в сильноточных дугах с ростом тока наблюдается значительное увеличение коэффициента электропереноса (массы вещества, расплавленной и испаренной на единицу заряда). Это связано с тем, что количество теплоты, поступающей на катод, пропорционально его площади, т. е. r^2 , а теплота, отводимая за счет теплопроводности, пропорциональна r . Поэтому большая часть поступающей

на катод энергии идет на плавление и испарение материала электрода. Из этого следует, что при токах сварочного режима потерями тепла на теплопроводность можно пренебречь. Кроме того, в случае сильноточных сварочных дуг, когда у электродов находятся пары их материалов, главную роль играет испарение и конвективными потерями можно пренебречь. Также часть энергии катод может терять в виде излучения. Однако эта энергия может быть поглощена парами и возвращена ему в виде вторичного излучения [2].

Просуммировав (21), (23) и (24), получим в первом приближении выражение для полной мощности, теряемой единицей площади катода,

$$P_{расх} = j_{\partial} \cdot \left(\Phi_{вых} + k_{nl} \cdot g_T + f \cdot \frac{\lambda_{испнК}}{e} \right). \quad (25)$$

Уравнение баланса представляет собой равенство приходных и расходных составляющих мощности на катоде:

$$\begin{aligned} f \cdot (U_k \cdot \alpha_i + U_i \cdot \alpha_0) &= \\ &= \Phi_{вых} + k_{nl} \cdot g_T + f \cdot \frac{\lambda_{испнК}}{e}. \quad (26) \end{aligned}$$

Из (26) получим более полное выражение для доли ионного тока

$$f = \frac{\Phi_{вых} + k_{nl} \cdot g_T}{U_k \cdot \alpha_i + U_i \cdot \alpha_0 - \frac{\lambda_{испнК}}{e}} \quad (27)$$

и полезную формулу для минимального значения катодного напряжения при заданном значении f , которое обеспечивает устойчивое горение дуги,

$$U_k = \frac{\Phi_{вых} + k_{nl} \cdot g_T}{f \cdot \alpha_i} + \frac{\lambda_{испнК}}{e \cdot \alpha_i} - U_i \cdot \frac{\alpha_0}{\alpha_i}. \quad (28)$$

Результаты модельных расчетов и их обсуждение

При расчетах воспользуемся значениями переменных и констант, приведенными в литературе и сведенными в табл. 1. Значения работы ионизации, выхода и теплофизические характеристики материалов взяты из [10].

Вначале получим значения доли ионного тока для различных катодов. Поскольку конец катода сварочной дуги находится в расплавленном состоянии, то при расчетах можно принять коэффициенты аккомодации равными единице. В табл. 2 приведены результаты расчета доли ионного тока по формуле (27) при одинаковом материале катода и анода.

Табл. 1. Значения переменных величин и констант, необходимых для расчетов

Материал	μ , кг/кмоль	U_k , В	U_i , эВ	$\Phi_{вых}$, эВ	j_{∂} , кА/см ²	k_{nl} , мккг/(А·с)	g_T , МДж/кг	g_K , МДж/кг	$\lambda_{испнК}$, 10 ⁻¹⁹ Дж/ат.	T , К	α
Al	27	13,5	5,98	4,25	1,5	2,44	0,74	2,73	5,34	2621	1
Ti	48	10,9	6,83	3,95	1,7	2,50	1,66	3,11	7,30	3442	1
Fe	56	12,4	7,89	4,31	2,0	3,20	1,25	2,26	6,89	3045	1
Ni	59	12	7,63	4,50	2,1	3,50	1,05	1,55	7,00	2415	1
Cu	64	11,9	7,72	4,40	2,0	5,28	0,54	1,46	5,61	3150	1

Табл. 2. Доли ионного тока в катодной области разных катодов, рассчитанные по формуле (27)

Материал катода	Al	Ni	Fe	Ni	Cu
Доля ионного тока f	0,38	0,62	0,52	0,54	0,45

Можно отметить, что полученные значения доли ионного тока находятся в разумных пределах и почти соответствуют обобщенной модели элементарных процессов в области «холодного» катода сварочной дуги, свободно горящей при атмосферном давлении. Из формулы (27) не следует, что увеличение катодного напряжения U_k приводит к падению ионного тока за счет какого-либо неучтенного процесса. При больших значениях U_k ионный ток мог бы

быть меньше, т. к. его энергии было бы достаточно для поддержания устойчивости дуги. Согласно обобщенной модели элементарных процессов, ионный ток в катодной области должен составлять половину тока дуги. С увеличением катодного напряжения дуга становится более устойчивой.

В табл. 3 представлены результаты расчетов баланса приходной и расходной мощности на катодах из различных материалов.

Табл. 3. Результаты расчетов баланса приходной и расходной мощности на разных катодах

Баланс	Катод				
	Al	Ti	Fe	Ni	Cu
$P_{кин}, \text{Вт/см}^2$	$7,61 \cdot 10^3$	$1,14 \cdot 10^4$	$1,29 \cdot 10^4$	$1,35 \cdot 10^4$	$1,07 \cdot 10^4$
$P_{пот}, \text{Вт/см}^2$	$3,37 \cdot 10^3$	$7,15 \cdot 10^3$	$8,20 \cdot 10^3$	$8,59 \cdot 10^3$	$6,96 \cdot 10^3$
$P_{приходн}, \text{Вт/см}^2$	$1,10 \cdot 10^4$	$1,85 \cdot 10^4$	$2,11 \cdot 10^4$	$2,21 \cdot 10^4$	$1,77 \cdot 10^4$
$P_{калорим}, \text{Вт/см}^2$	$6,38 \cdot 10^3$	$6,72 \cdot 10^3$	$8,62 \cdot 10^3$	$9,45 \cdot 10^3$	$8,80 \cdot 10^3$
$P_{исп}, \text{Вт/см}^2$	$1,88 \cdot 10^3$	$4,77 \cdot 10^3$	$4,47 \cdot 10^3$	$4,92 \cdot 10^3$	$3,16 \cdot 10^3$
$P_{пл}, \text{Вт/см}^2$	$2,73 \cdot 10^3$	$7,06 \cdot 10^3$	$7,98 \cdot 10^3$	$7,71 \cdot 10^3$	$5,73 \cdot 10^3$
$P_{расходн}, \text{Вт/см}^2$	$1,10 \cdot 10^4$	$1,85 \cdot 10^4$	$2,11 \cdot 10^4$	$2,21 \cdot 10^4$	$1,77 \cdot 10^4$
$\Delta = P_{прих} - P_{расх}$	0	0	0	0	0

Сравнивая приходные и расходные составляющие мощности на катодах, можно видеть их удивительно точное совпадение. Следует отметить, что баланс не нарушается при двух-трехкратном увеличении значений катодного напряжения либо дугового тока по сравнению с данными в табл. 1. Выполнение баланса энергии указывает на то, что в случае сильноточной дуги в парах рассматриваемых материалов совокупность и, возможно, интенсивность элементарных процессов в катодной обла-

сти одна и та же. Можно говорить о том, что полученные результаты подтверждают обоснованность обобщенной модели элементарных процессов в области «холодного» катода сварочной дуги, свободно горящей при атмосферном давлении. Рассмотренная в [8] зависимость плотности электронного тока эмиссии от ионного тока описывает возникновение электрической дуги из тлеющего разряда за счет взаимного усиления электронного и ионного токов. Предельный ток ограничивается

внешним сопротивлением и скоростью испарения материала электродов. Увеличение последней приводит к росту плотности пара, скорости ионизации и плотности ионного тока. В данной работе учтено испарение катода. Поскольку температура анода превышает температуру катода, то анод должен вносить заметный вклад в энергетический баланс. Поэтому в последующей работе следует рассмотреть элементарные процессы в анодной области и учесть влияние анода на разрядный ток.

Заключение

Детализирована обобщенная модель элементарных процессов в области «холодного» катода сварочной дуги, свободно горящей при атмосферном давлении. Показано, что при расчетах необходимо различать следующие токи: разрядный (ток дуги), ионный и элект-

ронной эмиссии i_e и i_e^n , численно равный ионному току. С учетом обобщенной модели и существующих данных получены выражения баланса энергии в катодной области и на «холодном» катоде сварочной дуги. Предложена формула для мощности, теряемой единицей площади катода в результате испарения материала электрода. На основе баланса энергии на катоде получено выражение для доли ионного тока в катодной области, которое учитывает как электрические параметры дуги и катода, так и теплофизические характеристики последнего. Численные расчеты доли ионного тока и энергетического баланса для некоторых технологически значимых материалов приводят к обнадеживающим результатам, совпадающим с существующими. Результаты подтверждают обоснованность обобщенной модели элементарных процессов в области «холодного» катода сварочной дуги.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Энгель, А.** Физика и техника электрического разряда в газах: в 2 т. Т. 2: Свойства газовых разрядов: технические применения / А. Энгель, М. Штенбек. – М.: ОНТИ, 1936. – 375 с.
2. **Грановский, В. Л.** Электрический ток в газе: установившийся ток / В. Л. Грановский. – М.: Наука, 1971. – 526 с.
3. **Райзер, Ю. П.** Физика газового разряда / Ю. П. Райзер. – Долгопрудный: Интеллект, 2009. – 736 с.
4. **Makhlin, N. M.** Processes occurring at excitation of the welding arc (Review) / N. M. Makhlin // *Avtomaticheskaya Svarka (Automatic Welding)*. – 2020. – № 9. – P. 54–60.
5. **Lee, T. H.** On the Mechanism of Electron Emission in Arcs with Low Boiling Point Cathodes / T. H. Lee // *J. Appl. Phys.* – 1957. – Vol. 28, № 920.
6. **Лесков, Г. И.** Электрическая сварочная дуга / Г. И. Лесков. – М.: Машиностроение, 1970. – 336 с.
7. **Добрецов, Л. Н.** Эмиссионная электроника / Л. Н. Добрецов, М. В. Гомоюнова. – М.: Наука, 1966. – 559 с.
8. **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.
9. **Петров, А. В.** Перенос металла в дуге при сварке плавящимся электродом в среде защитных газов / А. В. Петров // *Автоматическая сварка*. – 1955. – № 2.
10. **Таблица физических величин: справочник** / Под ред. И. К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.

Статья сдана в редакцию 16 декабря 2024 года

Контакты:
ali_lyarin@tut.by (Ляпин Али Ибрагимович).

A. I. LYAPIN

ENERGY BALANCE IN THE CATHODE REGION AND ON THE «COLD» CATHODE OF A FREE-BURNING WELDING ARC AT ATMOSPHERIC PRESSURE

Abstract

The article details the previously considered generalized model of elementary processes in the region of the «cold» cathode of a free-burning welding arc at atmospheric pressure. It is noted that in calculations it is necessary to distinguish between the following currents – discharge (arc current), ion and electron emission i_e and i_e^n , numerically equal to the ion current. Taking into account the generalized model and the existing data, expressions for the energy balance in the cathode region and on the «cold» cathode of the welding arc have been obtained. A formula is proposed for the power lost per unit area of the cathode as a result of evaporation of the electrode material. Based on the energy balance at the cathode, an expression has been obtained for the fraction of ion current in the cathode region, which takes into account both the electrical parameters of the arc and the cathode, and the thermophysical characteristics of the latter. Numerical calculations of the ion current fraction and energy balance for some technologically significant materials lead to encouraging results that coincide with the existing ones. The results confirm the validity of the generalized model of elementary processes in the region of the «cold» cathode of the welding arc.

Keywords:

welding arc, «cold» cathode, elementary processes, energy balance on the cathode.

For citation:

Lyapin, A. I. Energy balance in the cathode region and on the «cold» cathode of a free-burning welding arc at atmospheric pressure / A. I. Lyapin // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2025. – № 1 (86). – P. 81–91.