



МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРОВОЛОКИ НА ВЫХОДЕ ИЗ МУНДШТУКА ПРИ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ СВАРКЕ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

И. В. ПЕНТЕГОВ, д-р техн. наук, **О. И. ПЕТРИЕНКО**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведен метод расчета температуры проволоки на выходе ее из мундштука с учетом падения напряжения в месте контакта электродной проволоки с мундштуком сварочной горелки. Результаты расчетно-теоретического анализа хорошо согласуются экспериментальными данными.

Ключевые слова: механизированная сварка, углекислый газ, метод расчета, температура проволоки, падение напряжения

Анализ существующих теоретических и практических разработок по исследованию тепловых процессов в вылете электрода при дуговой сварке в среде защитных газов показал, что процессы распределения температуры изучены недостаточно.

В работе [1] приведен метод расчета распределения температуры по длине вылета электрода при дуговой сварке плавящимся электродом в углекислом газе, учитывающий нелинейность теплофизических коэффициентов и влияние тепла, поступающего от капли. Он позволяет вычислить температуру и ее градиент в любой точке на вылете электрода (от мундштука до капли) при заданной температуре электродной проволоки на выходе из мундштука.

В большинстве работ по исследованию процессов нагрева электродной проволоки при сварке в защитных газах нагрев электродной проволоки в мундштуке не учитывается [2], хотя предполагается, что увеличение температуры проволоки T_0 на выходе из мундштука заметно влияет на ее оплавление и может нарушать процесс сварки [3]. Поэтому начальная температура проволоки T_0 при выходе ее из мундштука — один из основных параметров, влияющих на падение напряжения на вылете электрода, и ее определение является важным фактором при создании математической модели дуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах в системе источник питания—сварочная дуга.

В математической модели тепловых и электрических процессов при дуговой сварке плавящимся электродом в среде защитных газов в системе источник питания—сварочная дуга, описанной в работах [1, 4], используется полагаемое известным значение падения напряжения в области контакта электродной проволоки с мундштуком сварочной горелки. Из работ [2, 5–7] следует, что температура проволоки T_0 при выходе ее из мундштука может составлять 150...450 °С (нижняя граница соответствует неизношенному медному

мундштуку, верхняя — мундштукам из бронзы различных марок и кермета при сильном износе).

Для построения математической модели и расчета T_0 необходимо знать действительное значение падения напряжения в контакте мундштук—проволока и иметь его аналитическое описание.

Определению падения напряжения в области контакта $U_{\text{кон}}$ электродной проволоки с мундштуком сварочной горелки посвящено много работ [3, 5–11], однако большинство из них имеют недостатки, не позволяющие использовать полученные данные в разработанной математической модели. Только в некоторых работах, например в [3], можно найти численные значения падения напряжения в контакте ($U_{\text{кон}} = 0,6...0,9$ В). Однако на отработанном мундштуке такое малое значение $U_{\text{кон}}$ получить вряд ли возможно. Например, при сварке аустенитной проволокой диаметром 2 мм с токоподводящим наконечником из бронзы оно составляет 2...4 В [11].

Для получения более достоверных сведений о значениях $U_{\text{кон}}$ разработана специальная методика [12], позволяющая определить значения $U_{\text{кон}}$ в области контакта электродной проволоки с мундштуком сварочной горелки экспериментальным путем с использованием компьютерных методов обработки экспериментальных данных. Также приведена степенная форма аппроксимации зависимости математического ожидания значения $U_{\text{кон}}$ от тока, скорости подачи проволоки и ее диаметра при неизношенном медном мундштуке, имеющая вид

$$U_{\text{кон}}(d, v_{\text{п}}, I) = \left[2,55 \left(\frac{I d_{\text{баз}}}{I_{\text{баз}} d} \right)^{0,2} - 1,78 \right] \left(\frac{v_{\text{п}}}{v_{\text{баз}}} \right)^{0,2} \text{ [В]}, \quad (1)$$

где d — диаметр электродной проволоки, м; $v_{\text{п}}$ — скорость подачи электродной проволоки, м/с; I — сварочный ток, А; $I_{\text{баз}}$, $d_{\text{баз}}$, $v_{\text{баз}}$ — базовые значения соответственно сварочного тока, диаметра электрода и скорости подачи ($I_{\text{баз}} = 180$ А; $d_{\text{баз}} = 1$ мм; $v_{\text{баз}} = 0,035$ м/с).

Целью настоящей работы является определение T_0 проволоки на выходе из мундштука, для чего необходимо найти, какая доля мощности, выделяемой в контакте, поступает в электродную проволоку.

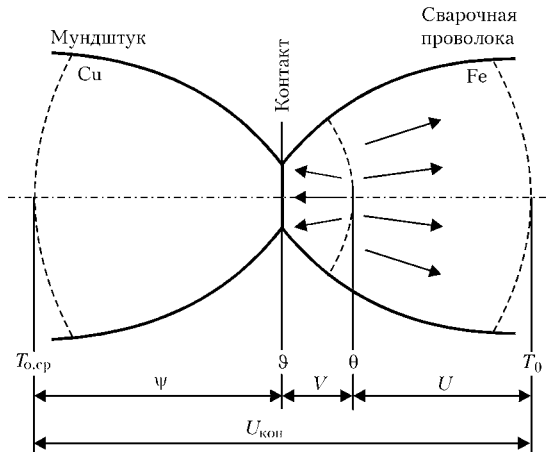


Схема распределения температур и падения напряжений в области стягивания электрического контакта двух разнородных металлов (по теории Хольма)

В работах [2, 5, 9, 13] показано, что проволока может иметь несколько электрических контактов в направляющем канале токоподводящего наконечника с температурой 440...850 °С [2]. Однако их реальное количество практически не влияет на результаты расчетов, поэтому достаточно ограничиться одним контактом.

Согласно теории Хольма [10], падение напряжения в контакте в нашем случае сосредоточено в области контакта электродной проволоки с мундштуком сварочной горелки (рисунок) и имеет вид

$$U_{\text{кон}} = \psi + V + U, \quad (2)$$

где ψ — падение напряжения в мундштуке, V — падение напряжения в стали (в электродной проволоке) от места контакта до границы поверхности, где зафиксирована максимальная температура, U — доля контактного падения напряжения в стали (в электродной проволоке) после границы поверхности с максимальной температурой, V .

Как видно из рисунка, на сопротивление зоны контакта решающее влияние оказывает температура [2]. При этом максимальный перегрев θ области стягивания тока зафиксирован не в месте контакта проволоки с мундштуком, а на некотором расстоянии от него в стальной проволоке. Тепло распространяется по обе стороны от области с максимальным перегревом θ — и в мундштук, и в электродную проволоку. Однако распределение температуры в них различно из-за разной теплопроводности.

Максимальный перегрев на участке проволоки возле места контакта ее с мундштуком можно разделить как

$$\theta = T_{\text{max}} - T_{\text{o,ср}}, \quad (3)$$

где T_{max} — максимальная температура в зоне контакта, К; $T_{\text{o,ср}}$ — температура окружающей среды, К. Непосредственно на границе контакта проволоки и мундштука перегрев составляет

$$\vartheta = T_{\text{к}} - T_{\text{o,ср}}, \quad (4)$$

где $T_{\text{к}}$ — температура на границе двух металлов, К.

Для случая контактов из разнородных металлов (медь-сталь) с удельным электрическим сопротивлением металлов ρ_{Cu} , ρ_{Fe} и теплопроводностью λ_{Cu} , λ_{Fe} до максимальной температуры нагревается именно проволока.

Из подобия токовых полей в областях стягивания (см. рисунок) следует [10], что

$$\psi \approx (V + U) \frac{\rho_{\text{Cu}}}{\rho_{\text{Fe}}}, \quad (5)$$

отсюда выражение (2) можно записать в виде

$$U_{\text{кон}} = (V + U) \left(1 + \frac{\rho_{\text{Cu}}}{\rho_{\text{Fe}}}\right). \quad (6)$$

В месте контакта электродной проволоки и мундштука сварочной горелки выделяется полная мощность

$$P_{\text{кон}} = U_{\text{кон}} I = P_{\text{м}} + P_{\text{п}}.$$

Часть этой полной мощности $P_{\text{м}}$, выделяемой в контакте электродной проволоки с мундштуком, уходит в него и рассеивается в окружающем пространстве, а нагрев проволоки осуществляется только долей полной мощности $P_{\text{п}}$, определяемой из выражения, в котором учтены (2) и (6):

$$P_{\text{п}} = UI = U_{\text{кон}} I \frac{U}{U + V + \psi} = P_{\text{кон}} \frac{1}{(1 + V/U)(1 + \rho_{\text{Cu}}/\rho_{\text{Fe}})} \quad (7)$$

Согласно теории Хольма, если имеет место квазинепо движный контакт, то падение напряжения в электродной проволоке на участке от контакта до границы поверхности с максимальной температурой определяется выражением

$$V = \sqrt{2\rho_{\text{Fe}}\lambda_{\text{Fe}}(\theta - \vartheta)}, \quad (8)$$

где ρ_{Fe} — удельное электрическое сопротивление проволоки, Ом·м, являющееся функцией температуры. Аппроксимация ρ_{Fe} приведена в работе [4], а аппроксимация температурной зависимости теплопроводности стали λ_{Fe} , Вт/(м·К) — в [1].

Падение напряжения в электродной проволоке после границы с максимальной температурой по Хольму равно

$$U = \sqrt{2\rho_{\text{Fe}}\lambda_{\text{Fe}}\theta}. \quad (9)$$

В результате решения (8) и (9) определим

$$\frac{V}{U} = \sqrt{1 - \frac{\vartheta}{\theta}}. \quad (10)$$

Падение напряжения в мундштуке (по теории Хольма) связано с другими параметрами более сложной зависимостью

$$\psi^2 + 2\psi V = 2\rho_{\text{Cu}}\lambda_{\text{Cu}}\vartheta. \quad (11)$$

Поскольку электропроводность металла мундштука намного больше, чем электродной проволоки, то $\psi \ll V$, и выражение (11) упрощается:

$$\psi \approx \frac{\rho_{\text{Cu}}\lambda_{\text{Cu}}\vartheta}{V}. \quad (12)$$



Приравняв (5) и (12), получаем

$$\frac{\rho_{Cu} \lambda_{Cu} \vartheta}{V} = V \left(1 + \frac{U}{V} \right) \frac{\rho_{Cu}}{\rho_{Fe}}$$

откуда

$$\rho_{Fe} \lambda_{Cu} \vartheta = V^2 \left(1 + \frac{U}{V} \right)$$

Подставляя вместо V^2 квадрат выражения (8) и используя (10), после преобразования имеем

$$\frac{\lambda_{Cu}}{2\lambda_{Fe}} = \frac{\theta}{\vartheta} \left[1 - \frac{\vartheta}{\theta} + \sqrt{1 - \frac{\vartheta}{\theta}} \right]$$

Решив это уравнение относительно $\sqrt{1 - \vartheta/\theta}$, получим

$$\sqrt{1 - \frac{\vartheta}{\theta}} = \left(1 + \frac{2\lambda_{Fe}}{\lambda_{Cu}} \right)^{-1} \quad (13)$$

С учетом выражения (9) определим

$$\frac{V}{U} = \left(1 + \frac{2\lambda_{Fe}}{\lambda_{Cu}} \right)^{-1} \quad (14)$$

Используя (7) и (14), мощность, выделяемая в месте контакта с проволокой, можно описать:

$$P_{II} = UI = \frac{P_{кон}}{2 \left(1 + \frac{\rho_{Cu}}{\rho_{Fe}} \right) \left(1 + \frac{\lambda_{Fe}}{\lambda_{Cu}} \right)} \left(1 + \frac{2\lambda_{Fe}}{\lambda_{Cu}} \right)$$

а падение напряжения в электродной проволоке после границы поверхности с максимальной температурой определяется с помощью выражения

$$U = \frac{U_{кон}}{2 \left(1 + \frac{\rho_{Cu}}{\rho_{Fe}} \right) \left(1 + \frac{2\lambda_{Fe}}{\lambda_{Cu}} \right)} \left(1 + \frac{2\lambda_{Fe}}{\lambda_{Cu}} \right) \quad (15)$$

При $\rho_{Cu}/\rho_{Fe} = 0,093$ и $\lambda_{Fe}/\lambda_{Cu} = 0,1$ (эти отношения практически постоянны в широком диапазоне температур) значение $U \approx 0,51 U_{кон}$.

После определения значения U падение напряжения в электродной проволоке от контакта до границы с максимальной температурой находим из выражения (6)

$$V = \frac{U_{кон}}{(1 + \rho_{Cu}/\rho_{Fe})} - U = \frac{U_{кон}}{2(1 + \rho_{Cu}/\rho_{Fe})(1 + \lambda_{Fe}/\lambda_{Cu})}$$

Воспользовавшись (5) для определения падения напряжения в мундштуке, запишем следующее выражение:

$$\psi = (V + U) \frac{\rho_{Cu}}{\rho_{Fe}} = \frac{U_{кон}}{1 + \rho_{Fe}/\rho_{Cu}}$$

В результате проведенных расчетов можно определить долю мощности P_m , поступающей в мундштук:

$$P_m = I(V + \psi) = I \frac{U_{кон}}{1 + \rho_{Cu}/\rho_{Fe}} \left[\left(2 + \frac{2\lambda_{Fe}}{\lambda_{Cu}} \right)^{-1} + \frac{\rho_{Cu}}{\rho_{Fe}} \right]$$

Зная значения падения напряжений в электродной проволоке до (V) и после (U) границы с максимальной температурой, можно рассчитать T_{max} по (3) и (9)

$$T_{max} = \frac{U^2}{2\rho_{Fe}\lambda_{Fe}} + T_{o.c.p}$$

и температуру на контактной границе по (4), (9) и (13)

$$T_k = \frac{U^2}{2\rho_{Fe}\lambda_{Fe}} \left[1 - \left(1 + \frac{2\lambda_{Fe}}{\lambda_{Cu}} \right)^{-2} \right] + T_{o.c.p} \quad (16)$$

Заметим, что при $U > 0,36$ В и $U_{кон} > 0,706$ В, если $T_{o.c.p} = 20$ °С (293 К), то T_{max} становится равной температуре плавления стали $T_{max} = T_{пл.с} = 1535$ °С (1808 К) и при дальнейшем росте U температура T_{max} уже не повышается, поскольку часть тепла расходуется на плавление стали. При этом расчеты T_k , согласно теории Хольма, становятся неточными. Однако по (16) это значение можно определить. Нежелательно, чтобы уровень значений T_k превышал значения температуры плавления меди $T_{пл.Сu} = 1083$ °С (1356 К), поскольку это накладывает ограничение на максимально допустимые значения U и $U_{кон}$.

Существуют допустимые значения доли полного падения напряжения $U_{доп}$ и падения напряжения в контакте $U_{доп}$. Расчет $U_{доп}$ по (16) при $T_k = 1083$ °С (1356 К), $\lambda_{Cu} = 380$ Вт/(м·К), $\lambda_{Fe} = 32$ Вт/(м·К), $\rho_{Fe} = 1,3 \cdot 10^{-6}$ Ом·м и $T_{o.c.p} = 20$ °С позволяет оценить уровень падения напряжения в области контакта:

$$U_{доп} = 0,6 \text{ В}; U_{кон,доп} = 1,2 \text{ В.}$$

На практике это требование часто не выполняется [12]. Если $U_{кон}$ больше указанного значения, то вследствие оплавления мундштука его износ резко увеличивается. Такие режимы сварки нежелательны из-за сокращения срока его работы. Во избежание оплавления мундштука необходимо, как это следует из формулы (1), вводить ограничения на выбор значений сварочного тока I и скорости подачи электродной проволоки v_{II} .

Как следует из (15), доля контактного падения напряжения в электродной проволоке после границы с максимальной температурой пропорциональна тепловой мощности, идущей в проволоку. Поэтому при упрощенных расчетах она может вычисляться с помощью следующих выражений: для медного мундштука $U = 0,51 U_{кон}$; для бронзового $U = 0,60 U_{кон}$.

Эти соотношения рассчитаны при следующих теплофизических параметрах $\rho_{Cu} = 1,75 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; $\rho_{Br} = 19 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; $\rho_{Fe} = 1,3 \cdot 10^{-6}$ Ом·м; $\lambda_{Cu} = 380$ Вт/(м·К); $\lambda_{Br} = 80$ Вт/(м·К); $\lambda_{Fe} = 32$ Вт/(м·К).



Параметр	d, мм			
	0,8		1,2	
I, А	100	150	150	200
v _п , м/с	0,083	0,133	0,063	0,137
U _{кон} , В	0,702	1,033	0,664	0,960
U, В	0,358	0,527	0,339	0,490
T ₀ , К	597,4	574,55	664,4	549,2
T _к , К	830,5	1457	774,4	1299

Расчеты показали, что полученные соотношения практически не изменяются при варьировании параметров и режимов сварки.

Значения U из выражения (15) могут быть использованы для определения T₀. Доля U контактного падения напряжения в электродной проволоке после границы с температурой T_{max} связана с T₀ проволоки на выходе из мундштука зависимостью, полученной в работе [4]:

$$U = \frac{\gamma v_{п}}{j} \int_{T_{o.c.p}}^{T_0} C_p(T) dT, \quad (17)$$

где $\gamma = 7860$ — плотность стали, кг/м³; $j = 4I / \pi d^2$ — плотность тока в электродной проволоке, А/м; C_p(T) — текущее значение удельной изобарной теплоемкости металла проволоки, Дж/(кг·К), для определения которой можно воспользоваться аппроксимацией из работы [4].

На основании работы [1] с учетом (17) имеем

$$T_0 = \text{root} \left[v_{п} \int_{T_{o.c.p}}^x C_p(\theta) d\theta - jU, x \right]. \quad (18)$$

Здесь U вычисляется по (15). При этом отмеченная выше погрешность расчета по теории Хольма, возникающая при U > 0,36 В и U_{кон} > 0,706 В, практически не влияет на точность определения T₀, поскольку все тепло, затраченное на временное локальное расплавление металла в зоне T_{max}, идет на повышение средней температуры проволоки на выходе из мундштука. Выражение (18) служит для определения температуры проволоки T₀ на выходе из мундштука, являющейся необходимым параметром при создании математической модели процессов механизированной сварки сталей в защитных газах в системе источник питания—сварочная дуга.

Результаты расчетов приведены в таблице.

Выводы

1. С учетом теории Хольма определена доля полного контактного падения напряжения в электродной проволоке после границы с максимальной

Described is the method for calculation of temperature of wire at its outlet from the nozzle, allowing for the voltage drop in location of contact of the wire with the welding torch nozzle. The theoretical-calculation analysis results are in good agreement with experimental data.

температурой в контакте мундштук—проволока. Эта доля ответственна за нагрев электродной проволоки в мундштуке при дуговой сварке плавящимся электродом. Получены формулы для ее определения.

2. Предложенная методика определения начальной температуры электродной проволоки T₀ при выходе ее из мундштука может быть использована для создания математической модели системы источник питания—сварочная дуга при механизированной сварке сталей в защитных газах.

3. Получены выражения для определения полной мощности, выделяемой в месте контакта электродной проволоки и мундштука сварочной горелки, а также выражения, позволяющие установить, какая часть этой мощности уходит в мундштук и рассеивается в окружающем пространстве, а какая отводится в виде тепла от контакта в проволоку. Найдены значения температуры перегрева в контактной зоне.

1. *Пентегов И. В., Петриенко О. И.* Расчет распределения температуры по длине вылета электрода с учетом тепла, поступающего от капли // Автомат. сварка. — 2003. — № 7. — С. 23–28.
2. *Маришкин А. К., Попков А. М., Постаушкин В. Ф.* Плавление электродной проволоки при автоматической сварке с систематическими короткими замыканиями дугового промежутка // Там же. — 1970. — № 4. — С. 9–11.
3. *Кошкарёв Б. Т., Михайлов А. Н., Будник Н. М.* Влияние вылета на процесс плавления электрода при сварке в СО₂ // Свароч. пр-во. — 1971. — № 11. — С. 30–32.
4. *Пентегов И. В., Петриенко О. И.* Метод расчета падения напряжения по длине вылета электрода с учетом нелинейности теплофизических параметров // Автомат. сварка. — 2002. — № 4. — С. 30–33.
5. *Бригидин В. Я.* О работе токоподводящих наконечников при дуговой сварке // Свароч. пр-во. — 1979. — № 8. — С. 20–21.
6. *Варуха Е. Н.* Учет предварительного подогрева проволоки в математической модели плавления электрода при механизированной сварке // Соврем. пробл. свароч. науки и техники «Сварка-97»: Материалы Рос. науч.-техн. конф., г. Воронеж, 1997. — Воронеж: Воронеж. гос. архит.-строит. акад., 1997. — 224 с.
7. *The contact-tube distance in gas-shielded metal-arc welding. How does it work?* // Welding and Cutting. — 2002. — № 2. — P. 80–83.
8. *Eichhorn F., Engel A.* Verzweigungen des Schweißstromes im Kontaktrohr und der stromführenden Schlacke beim Unterpulverschweißen // Schweißen und Schneiden. — 1971. — № 3. — S. 27–30.
9. *Чубуков А. А.* Сопротивление в контакте наконечник—сварочная проволока при сварке в углекислом газе // Свароч. пр-во. — 1980. — № 12. — С. 31–32.
10. *Хольм Р.* Электрические контакты / Под ред. Д. Э. Брускина, А. А. Рудницкого. — М.: Изд-во иностр. лит., 1961. — 464 с.
11. *Бригидин В. Я., Колотон Д. А.* Распределение тока в контактной паре электродная проволока—наконечник сварочного автомата или полуавтомата // Автомат. сварка. — 1977. — № 6. — С. 21–24.
12. *Определение* падения напряжения в области контакта электродной проволоки с мундштуком сварочной горелки при механизированных видах дуговой сварки / И. В. Пентегов, О. И. Петриенко, С. В. Пустовойт и др. // Там же. — 2005. — № 6. — С. 12–17.
13. *Zwickert H.* Untersuchung der Kontaktverhältnisse bei der Stromübertragung auf den Schweißdraht // Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität «Otto von Guericke». — Magdeburg, 1987. — 4. — S. 96–102.

Поступила в редакцию 01.11.2004