

3. Chernysh V.P. Welding with electromagnetic interfusion / V.P. Chernysh and other. – K.: Technics, 1983. – 127 p. (Rus.)
4. Berezovskii B.M. Tension concentration coefficient in the butt welded joint / B.M. Berezovskii, O.M. Bakshi // Works Chelyab. polytechn. institute. Voprosy svarochnogo proizvodstva. – 1981. – № 266. – P. 3 – 10. (Rus.)
5. Belchuk G.A. About some dependences of weld forming in the place of interface of weld with a parent metal / G.A. Belchuk, V.S. Naletov. // Svarka v sudostroenii. – Вып. 79. – L.: LKI, 1972. – P. 21 – 28. (Rus.)

Рецензент: В.В. Чигарев
д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 19.03.2012

УДК 621.791.754:51-74

©Пентегов И.В.¹, Письменный А.С.², Петриенко О.И.³, Сидорец В.Н.⁴,
Рымар С.В.⁵, Жерносеков А.М.⁶, Петриенко Л.П.⁷

СРАВНЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО И ЧИСЛЕННОГО МЕТОДОВ РАСЧЕТА РЕЖИМОВ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ СВАРКИ В СРЕДЕ ЗАЩИТНЫХ ГАЗОВ

Приведен сравнительный анализ аналитического и численного методов расчета режимов механизированной дуговой сварки сталей в среде защитных газов без коротких замыканий. Аналитическое решение уравнения теплопроводности Фурье, позволяет описать распределение температуры в нерасплавленной части вольта электрода. Показано, что результаты расчета, полученные с помощью аналитического и численного методов, практически совпадают, однако аналитический метод расчета кроме простоты обладает рядом других существенных преимуществ.

Ключевые слова: механизированная сварка, защитные газы, режимы сварки, расчет, аналитический метод, численный метод.

Пентегов І.В., Письменний О.С., Петрієнко О.І., Сидорець В.М., Рymar С.В., Жерносеков А.М., Петрієнко Л.П. Порівняння аналітичного і чисельного методів розрахунку режимів механізованого зварювання в середовищі захисних газів. Наведено порівняльний аналіз аналітичного та чисельного методів розрахунку режимів механізованого дугового зварювання сталей у середовищі захисних газів без коротких замикань. Аналітичний розв'язок рівняння теплопровідності Фур'є дозволяє описати розподіл температури в нерозплавленій частині вольту електрода. Показано, що результати розрахунку, отримані за допомогою аналітичного та чисельного методів, практично збігаються, однак аналітичний метод розрахунку крім простоти має ряд інших суттєвих переваг.

Ключові слова: механізоване зварювання, захисні газы, режими зварювання, розрахунок, аналітичний метод, чисельний метод.

¹ д-р техн. наук, професор, Інститут електросварки ім. Е.О. Патона НАН України, г. Київ

² д-р техн. наук, професор, Інститут електросварки ім. Е.О. Патона НАН України, г. Київ

³ канд. техн. наук, Інститут електросварки ім. Е.О. Патона НАН України, г. Київ

⁴ д-р техн. наук, ст. науч. сотр., Інститут електросварки ім. Е.О. Патона НАН України, г. Київ

⁵ д-р техн. наук, ст. науч. сотр., Інститут електросварки ім. Е.О. Патона НАН України, г. Київ

⁶ канд. техн. наук, ст. науч. сотр., Інститут електросварки ім. Е.О. Патона НАН України, г. Київ

⁷ инж., Інститут електросварки ім. Е.О. Патона НАН України, г. Київ

I.V. Pentegov, O.S. Pysmennyu, O.I. Petriienko, V.M. Sydorets, S.V. Ryamar, A.M. Zhernosiekov, L.P. Petriienko. Comparison of Analytical and Numerical Methods for Calculating the Modes of Mechanized Welding in Shielding Gases. The comparative analysis of analytical and numerical methods for calculating the modes of mechanized arc welding of steels in shielding gases without short circuits has been given. The analytical solution of the Fourier heat equation allows us to describe the temperature distribution in the unfused part of electrode. It is shown that the calculation results obtained by analytical and numerical methods are practically identical, but the analytical method of calculation other than simplicity has some other significant advantages.

Keywords: *mechanized welding, shielding gases, welding modes, calculation, analytical method, numerical method.*

Постановка проблеми. Производительность процесса дуговой сварки непосредственно определяется скоростью плавления электрода. Поэтому был и остается актуальным вопрос, как зависит скорость плавления проволоки от сварочного тока и других параметров. Знание этих закономерностей позволит повысить производительность и экономическую эффективность процесса механизированной дуговой сварки.

Анализ последних исследований и публикаций. Существующие математические модели плавления электродной проволоки можно разделить на эмпирические, аналитические и численные. Эмпирические модели предусматривают построение аппроксимирующих функций для полученных экспериментальных зависимостей параметров процесса дуговой сварки от скорости подачи электрода при учете факторов, определяющих нагрев электрода. Такие модели ограничены тем, что они справедливы для конкретного диапазона параметров сварки, изменение которых предполагает проведение нового большого комплекса исследований. Аналитические модели основаны на уравнении баланса мощностей в вылете электрода и решении дифференциального уравнения теплопроводности для металлического стержня при условии независимости теплофизических свойств материала электрода от температуры и, отчасти, произвольное задание величины теплового потока от капли в вылет электрода, что вносит неточность в расчет. Численные модели позволяют учесть температурную зависимость теплофизических свойств материала электрода и тем самым повысить точность расчетов.

Общими недостатками существующих моделей является [1]: отсутствие заранее определенных диапазонов изменения тока, где они применимы; отсутствие аналитического описания закономерностей нагрева электрода в мундштуке и поступления тепла в его вылет от анодной области дуги, которые являются граничными условиями для решения дифференциального уравнения теплопроводности.

В работах [2-8] приведено описание составляющих алгоритма и самого аналитического метода расчета режимов механизированной дуговой сварки сталей в защитных газах с учетом нелинейности теплофизических параметров, изменения химического состава металла электрода, и учетом тепла, поступающего в вылет электрода от капли. При расчетах необходимо задаваться диаметром электрода d , током сварки I , температурой предварительного подогрева электрода T_1 и температурой капли $T_{\text{кап}}$, (которые в процессе расчета могут уточняться). В результате с большой точностью определяются значения скорости подачи $v_{\text{п}}$ и длины вылета электрода $l_{\text{в}}$, при которых обеспечиваются эти температуры. Оптимальным является алгоритм, в котором данные значения температур выбираются в начале расчета, а скорость подачи проволоки, длина вылета электрода и другие параметры режима рассчитываются из условий сохранения теплового баланса на вылете и поддерживаются во время сварки на требуемом уровне. При этом решается задача определения именно тех параметров, которыми прежде произвольно задавались. И уже после этого можно использовать численные методы расчета, как проверочные.

Цель статьи – определить общие подходы применения аналитического и численного методов расчета режимов механизированной дуговой сварки сталей в среде защитных газов без коротких замыканий, сравнить результаты, получаемые с их помощью, и дать рекомендации по их использованию.

При расчетах вылет электрода условно разделен на два участка (рис. 1): участок $0 < l \leq l_1$, примыкающий к мундштуку и нагреваемый электрическим током, на котором несущественно влияние тепла, идущего от капли; участок вылета электрода Δl , примыкающий к капле, на ко-

тором происходит нагрев под действием электрического тока и тепла, поступающего за счет теплопроводности от капли [9-12]. Тепловые процессы на этих участках описываются разными уравнениями. Точка «сопряжения» этих решений находится на расстоянии Δl от границы электрода с каплей. Она характеризуется температурой T_1 и находится на расстоянии l_1 от мундштука.

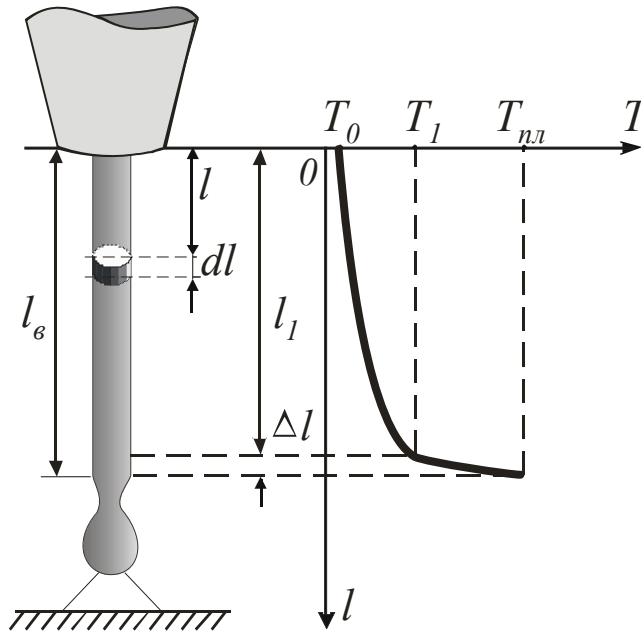


Рис. 1 – Схема распределения температуры по длине вылета электрода

На первом участке тепловые процессы описываются с учетом нелинейных зависимостей теплофизических параметров от температуры, а на втором участке задача решается при средних для данного интервала теплофизических параметрах.

Методы расчета основаны на введении допущений [13-22]:

- потерями тепла на конвекцию и излучение пренебрегаем ввиду малости влияния этих факторов на тепловые процессы в вылете электрода;
- на первом участке тепловые процессы считаются с учетом точных зависимостей изменения теплофизических параметров от температуры, а на втором – при средних для данного интервала теплофизических параметрах;
- на первом участке вылета электрода пренебрегаем теплом, поступающим в вылет от капли ввиду незначительного его влияния на нагрев этого участка вылета;
- температура $T_{\text{кап}}$ является средним значением.

Дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье [9] имеет следующий вид:

$$\gamma C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial l} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial l} \right) + \rho(T) j^2, \quad (1)$$

где γ , C_p , λ , ρ , – плотность, удельная изобарная теплоемкость, коэффициент теплопроводности, удельное электрическое сопротивление металла электродной проволоки соответственно;

T – значение температуры на вылете электрода;

j – плотность тока.

Первое слагаемое в правой части уравнения (1) может быть представлено в виде:

$$\frac{\partial}{\partial l} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial l} \right) = \lambda(T) \frac{\partial^2 T}{\partial l^2} + \frac{d\lambda}{dT} \left(\frac{\partial T}{\partial l} \right)^2 + \lambda(T) \frac{\partial^2 T}{\partial l^2}. \quad (2)$$

Вторым слагаемым правой части уравнения (2) пренебрегаем ввиду его малости по сравнению с первым членом [17, 18].

Если выбрать систему координат неподвижной относительно проволоки, то есть движущейся вместе с ней с постоянной скоростью подачи v_n , то в уравнении (1) можно сделать замену переменной $dt = dl/v_n$ [2-8]. С учетом формулы (2) уравнение теплопроводности приобретает вид:

$$\lambda(T) \frac{\partial^2 T}{\partial l^2} - \gamma v_n C_p(T) + \rho(T) j^2 = 0. \quad (3)$$

Градиент температуры на участке $0 < l \leq l_1$ определяется с учетом того, что теплопроводность оказывает влияние на нагрев вылета электрода не по всей его длине, а преимущественно в области, которая примыкает к капле, поэтому, пренебрегая первым членом уравнения (3), находим для первого участка:

$$\frac{\partial T}{\partial l} = \frac{\rho(T) j^2}{\gamma v_n C_p(T)}. \quad (4)$$

Из уравнения (4) определяется зависимость между текущим значением длины вылета электрода и температурой на первом участке вылета электрода, на котором нагрев осуществляется только проходящим током:

$$l(T) = \frac{\gamma v_n}{j^2} \int_{T_0}^T \frac{C_p(\theta)}{\rho(\theta)} d\theta, \quad (5)$$

где T_0 – начальная температура проволоки на выходе из мундштука [5].

Формула (5) справедлива для первого участка вылета электрода, при этом $l_1 = l(T_1)$. Здесь при расчете могут использоваться нелинейные аппроксимации $C_p(T)$ и $\rho(T)$ из работы [2].

Для проведения дальнейших расчетов необходимо знать значение температуры проволоки T_0 при выходе ее из мундштука (определению которой посвящена работа [5]). Так как ее значения могут лежать в диапазоне температур 350...733 К, то это может существенно повлиять на дальнейший характер протекания тепловых процессов в вылете электрода. В свою очередь, для определения температуры T_0 необходимо знать величину падения напряжения $U_{кон}$ в контакте «мундштук – электродная проволока». В результате экспериментальных исследований было установлено [4], что формула для падения напряжения на контакте «мундштук – проволока» $U_{кон}$, измеряемого в вольтах, имеет вид:

$$U_{кон}(d, v_n, I) = \left[2.55 \left(\frac{I d_{баз}}{I_{баз} d} \right)^{0.2} - 1.78 \right] \left(\frac{v_n}{v_{баз}} \right)^{0.2}, \quad (6)$$

где $I_{баз} = 180$ А,

$d_{баз} = 1$ мм,

$v_{баз} = 35$ мм/с;

d – диаметр электрода.

Для неизношенного медного мундштука $U_{кон} = 0,2...1,5$ В, что обусловлено случайными изменениями величины контактного сопротивления и длины «скрытого» участка вылета электрода.

Для второго участка вылета электрода Δl уравнение (3) решается с учетом теплопроводности металла электрода. Для получения аналитического решения на втором участке вылета электрода использовались усредненные теплофизические параметры на интервале интегрирования со следующими аппроксимациями [2, 3]:

$$a = \frac{\gamma v_n}{T_{нл} - T_1} \int_{T_1}^{T_{нл}} \frac{C_p(T)}{\lambda(T)} dT; \quad b = \frac{j^2}{T_{нл} - T_1} \int_{T_0}^{T_{нл}} \frac{\rho(T)}{\lambda(T)} dT. \quad (7)$$

С учетом выражений (7) уравнение (3) имеет вид:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial l_2} - a \frac{\partial T}{\partial l} + b = 0. \quad (8)$$

Решение уравнения (8), приведенное в работах [3-8], позволяет найти распределение температуры на участке Δl вылета электрода $l_1 \leq l < l_2$:

$$T(l) = \frac{e^{a(l-l_1)} - 1}{e^{a\Delta l} - 1} \left(T_{nl} - T_1 - \frac{b}{a} \Delta l \right) + \frac{b}{a} (l - l_1) + T_1. \quad (9)$$

Для получения аналитического решения уравнения теплопроводности по уравнениям (5) и (9) необходимо сначала выбрать величину j [3, 6] и определить v_n и Δl . Выражение (9) обеспечивает условие сопряжения решений на рассматриваемых двух участках вылета электрода по температуре в точке с температурой предварительного подогрева T_1 . Чтобы обеспечить минимально возможное расхождение градиентов температуры в точке «сопряжения» величину Δl можно определять по упрощенной формуле:

$$\Delta l = \frac{1}{a} \ln \left[a(T_{nl} - T_1) \frac{C_p(T_1) v_n \gamma}{\rho(T_1) \delta j^2} \right], \quad (10)$$

где $\delta = 0,5\%$ – задаваемая доля [23] тепловой мощности, проходящей через сечение электрода в точке $l = l_1$, от полной мощности, поступающей от капли в электрод.

Величина скорости подачи проволоки v_n находится из решения уравнения теплового баланса, если заданы j , d , температуры T_1 и $T_{\text{кап}}$:

$$v_n \gamma \left(\int_{T_1}^{T_{\text{кап}}} C_p(T) dT + \lambda_{A2} + \lambda_{A3} + \lambda_{A4} + \lambda_{A5} \right) = (U_{\text{экр}} + U_{\Delta l} + U_{\text{кап}}) j, \quad (11)$$

где $\lambda_{A2}, \lambda_{A3}, \lambda_{A4}, \lambda_{A5}$ – удельные теплоты фазовых переходов металла электрода [7];
 $U_{\text{экр}}$ – эквивалентное напряжение при плавлении дугой [6];

$$U_{\Delta l} = j \rho \left(\frac{T_{\text{ив}}}{2} + \frac{T_1}{2} \right) l_1(T_1) - \text{напряжение на участке вылета электрода } \Delta l \text{ при усред-$$

ненном значении ρ ;

$U_{\text{кап}} = j \rho(T_{\text{кап}}) k_{\text{ш}} d$ – среднее значение падения напряжения на капле, обусловленное мощностью, выделяемой в шейке капли; $k_{\text{ш}}$ – геометрический коэффициент шейки капли [6].

Градиент температур в точке $l = l_b$ может быть определен по закону Фурье уравнениями: по тепловому балансу со стороны дуги и капли

$$\frac{\partial T}{\partial l} \Big|_{l=l_b} = \frac{1}{\lambda(T_{nl})} \left[(U_{\text{экр}} + U_{\text{кап}}) j - v_n \gamma \left(\int_{T_{nl}}^{T_{\text{кап}}} C_p(T) dT + \lambda_{A5} \right) \right], \quad (12)$$

по тепловому балансу со стороны вылета электрода

$$\frac{\partial T}{\partial l} \Big|_{l=l_b} = \frac{1}{\lambda(T_{nl})} \left[v_n \gamma \left(\int_{T_1}^{T_{nl}} C_p(T) dT + \lambda_{A2} + \lambda_{A3} + \lambda_{A4} \right) - U_{\Delta l} j \right]. \quad (13)$$

Если величина v_n является решением уравнения (11), то градиенты температуры в (12) и (13) совпадают. Уравнение для расчета градиента температур в точке $l = l_b$ можно найти, дифференцируя формулу (9), полученную в результате аналитического решения с усредненными теплофизическими параметрами:

$$\frac{\partial T}{\partial l} \Big|_{l=l_b} = \frac{v_n \gamma (\lambda_{A2} + \lambda_{A3} + \lambda_{A4})}{\lambda(T_{nl})} + \left[\frac{a e^{a\Delta l}}{e^{a\Delta l} - 1} \left(T_{nl} - T_1 - \frac{b}{a} \Delta l \right) + \frac{b}{a} \right]. \quad (14)$$

В правой части этого уравнения учтена удельная мощность, затрачиваемая на фазовые переходы, так как аналитическое решение не учитывает их наличие. Формула (14) дает небольшую погрешность, связанную с усреднением параметров. Величины a и b определяются по формулам (7) и являются функциями v_n, j и T_1 .

Следует отметить, что величины $T_1, T_{\text{кап}}$ и ток сварки I должны задаваться в рекомендуемых пределах [6].

В ряде случаев требуется корректировка выбранных значений заданных параметров. В первую очередь это касается скорости подачи проволоки. Отклонение величины v_n от расчет-

ной приводит к нарушению теплового баланса (уравнения (12), (13) и (14) по разному реагируют на изменение v_n), и к необходимости корректировки величин T_1 и $T_{\text{кап}}$, а иногда и величины выбранного тока I и плотности тока j .

Полученные формулы позволяют рассчитать обеспечивающие тепловой баланс величины v_n и l_b при различных значениях плотности тока j в электродной проволоке, если параметры d , T_1 и $T_{\text{кап}}$ заданы.

Рассчитав величину $\Delta l(T_1)$ по формуле (10), можно определить полную длину вылета электрода: $l_b = l(T_1) + \Delta l(T_1)$.

Если при расчетах задаваться током I в рекомендуемом диапазоне, при котором температура $T_0 < 0,75T_1$, то это и будет тем необходимым дополнительным условием, которое позволяет решить уравнение теплового баланса аналитически. Такое решение дифференциального уравнения теплопроводности Фурье, полученное в виде выражений (5) и (9), представлено в виде утолщенной кривой на рис. 2. Построить подобную кривую возможно и с применением численных методов расчета. Для этого необходимо взять все граничные условия и скорость подачи электродной проволоки из аналитического метода решения. При решении уравнения Фурье без упрощений численными методами теряется возможность теоретических обобщений и анализа, которые необходимы для решения поставленной задачи.

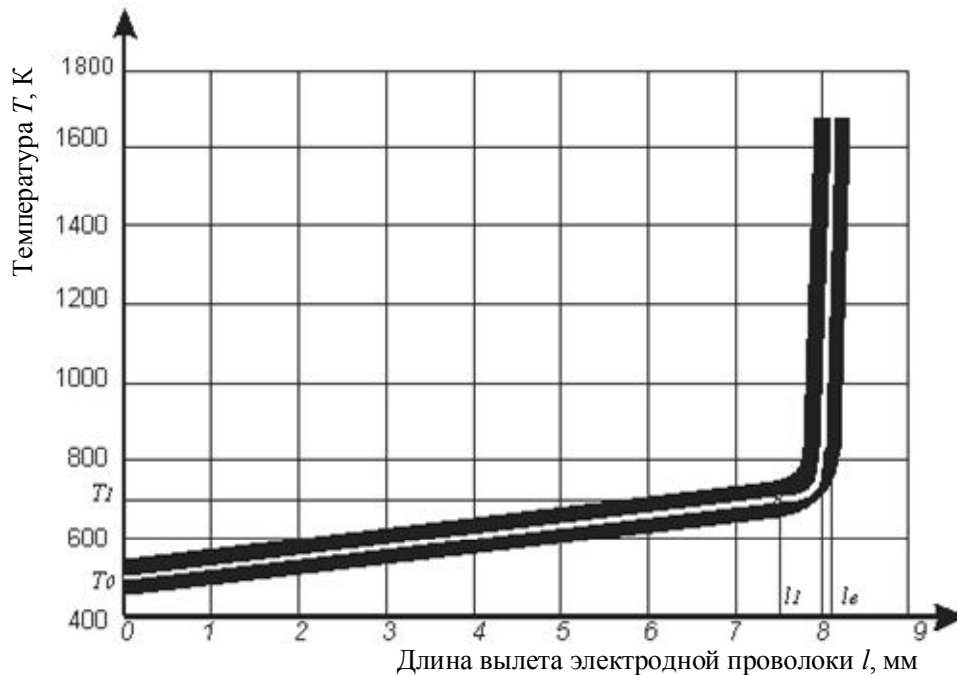


Рис. 2 – Распределение температуры по длине вылета электродной проволоки, рассчитанное с помощью аналитического (утолщенная кривая) и численного методов (тонкая белая кривая): сварка в $\text{Ag} + 2\% \text{O}_2$, проволока Св-08ГА, обратная полярность, $d = 1,2$ мм, $I = 195$ А, $v_n = 104$ мм/с, $T_1 = 700$ К, $T_{\text{кап}} = 2800$ К, $T_0 = 488$ К, $\Delta l = 0,622$ мм, $l_b = 8,42$ мм, при $l = l_b$ величина $dT/dl = 1,97 \cdot 10^7$ К/м

Если брать в качестве начальных условий температуру T_0 и градиент температуры на границе проволоки с мундштуком, то решение не может быть получено, так как влияние температуры капли на температуру вылета электрода вблизи мундштука практически отсутствует. Если же в качестве начальных условий выбрать температуру и градиент температуры на границе электродной проволоки с каплей, то можно получить однозначное решение поставленной задачи численными методами.

Поэтому для проверки аналитического метода с помощью численного метода необходимо решать обратную задачу. В качестве исходного берем уравнение (3) и выявляем условия его решения численными методами. При таком подходе к решению вводится новая переменная $x = l_b - l$ и $dl = -dx$. Введем обозначения $dT/dx = Y_1$, $T = Y_0$ и решим систему из двух уравнений:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = Y_1; \tag{15}$$

$$\frac{\partial Y_1}{\partial x} = -j^2 \frac{\rho(Y_0)}{\lambda(Y_0)} - \gamma v_n \frac{C_p(Y_0)}{\lambda(Y_0)} Y_1.$$

Запишем функцию

$$f(v_n) = \frac{v_n \gamma}{\lambda(T_{nl})} (\lambda_{A2} + \lambda_{A3} + \lambda_{A4}), \tag{16}$$

являющуюся суммой приращений градиентов, теряемых на фазовых переходах. Фазовые переходы происходят при разных температурах. Для разных марок сталей эти температуры точно не известны. Имеются данные [24, 25] по чистому железу. Поэтому целесообразно принять следующее приближение. Удельные теплоты превращений железа в точках фазовых переходов для всех марок электродных проволок такие же, как и у чистого железа. Будем считать, что все фазовые переходы происходят одновременно при $T = T_4 = 1670$ К и $x = 0$.

При таком подходе при $x = l_b$ (или $l = 0$) решение дает наилучшее приближение к температуре T_0 , найденной аналитическим методом. Тогда эквивалентная расчетная производная $T'_{экр}$ в точке $x = 0$ может быть принята равной:

$$T'_{экр} = -\frac{1}{\lambda(T_{nl})} \left(v_n \gamma \int_{T_1}^{T_{nl}} C_p(T) dT - U_{\Delta l} j \right), \tag{17}$$

или

$$T'_{экр} = -\frac{ae^{a\Delta l}}{e^{a\Delta l} - 1} \left(T_{nl} - T_1 - \frac{b}{a} \Delta l \right) + \frac{b}{a}. \tag{18}$$

Этот градиент отрицателен и по модулю меньше чем градиент, получаемый по уравнениям (12) – (14) на величину $f(v_n)$.

Решение системы уравнений (15) (при принятых допущениях начальными условиями являются температура T_4 и эквивалентная расчетная производная $T'_{экр}$ в точке $x = 0$ вблизи границы электрода с каплей) может быть определено методом Рунге-Кутты в программе MathCAD. Получаем кривую распределения температуры по длине вылета электрода, затем вновь реверсируем ее, заменяя x на l_b . В результате получаем кривые, построенные аналитическим и численным методами расчета.

На рис. 2. показаны, построенные по аналитическому и численному методам, графики распределения температуры по длине вылета электродной проволоки от мундштука до l_b с учетом нелинейности теплофизических параметров процесса и тепла, поступающего в проволоку от капли и от дуги. Видно, что кривые, полученные с помощью двух разных методов расчета, практически сливаются. Это позволяет сделать вывод о хорошем совпадении результатов аналитического и численного методов расчета. На рис. 3 приведен график относительного отклонения расчетов ξ , представляющий собой отношение разности распределений температур на вылете электрода, рассчитанных численным и аналитическим методами, к соответствующим температурам, полученным аналитическим методом.

Относительное отклонение аналитического и численного методов расчета не превышает 3%, что говорит о хорошем совпадении результатов двух методов. Однако, необходимо отметить, что применение численного метода возможно в том случае, если известны значения v_n , l_b , T_0 , T_1 и $T_{кап}$, которые можно рассчитать только аналитическим методом. Численный метод хорошо использовать как проверочный и в тех случаях, когда требуется учитывать теплоизлучение с поверхности вылета электрода или, например, учитывать влияние второго слагаемого в правой части уравнения (2).

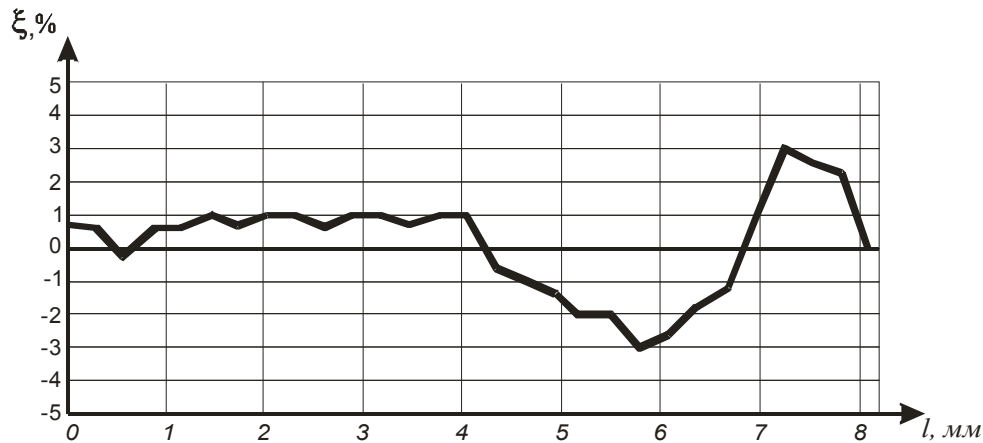


Рис. 3 – Відносне відхилення розподілу температури по довжині вильоту електрода, розраховані аналітичним і чисельним методами

Висновки

1. Приведений алгоритм аналітичного і чисельного рішення рівняння теплопровідності Фур'є, дозволяє визначити всі параметри режимів процесу механізованої зварки в середі захисних газів без коротких замикань.
2. Застосування чисельного методу неможливо без використання значень швидкості подачі дроту, температури краплі і температури попереднього підігріву, які можна отримати тільки аналітичним методом. Рекомендується дані значення температур вибирати в початку розрахунку, а швидкість подачі дроту, довжина вильоту електрода і інші параметри режиму розраховуються з умов теплового балансу на вильоті електрода. При цьому вирішується задача визначення саме тих параметрів, якими раніше довільно задавалися. І вже після цього слід використовувати чисельні методи розрахунку, як перевірочні.
3. Аналітичний і чисельний методи дають практично повне співпадіння рішень поставленої задачі. Відносне відхилення результатів аналітичного і чисельного методів розрахунку не перевищує 3%.

Список використаних джерел:

1. Варуха Е.Н. Нагрів і плавлення електрода при дугової механізованої зварки / Е.Н. Варуха. Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.06 / Донської державний технічний університет (ДГТУ). – Ростов-на-Дону : 1998. – 40 с.
2. Пентегов І.В. Метод розрахунку падіння напруги по довжині вильоту електрода з урахуванням нелінійності теплофізических параметрів / І.В. Пентегов, О.І. Петриєнко // Автоматическа зварка. – 2002. – № 4. – С. 30-33.
3. Пентегов І.В. Розрахунок розподілу температури по довжині вильоту електрода з урахуванням тепла, поступаючого від краплі. / І.В. Пентегов, О.І. Петриєнко // Автоматическа зварка. – 2003. – № 7. – С. 23-28.
4. Визначення падіння напруги в області контакту електродної дроту з мундштуком зварочної горелки при механізованих видах дугової зварки / І.В. Пентегов, О.І. Петриєнко, С.В. Пустойт і др. // Автоматическа зварка. – 2005. – № 6. – С. 12-17.
5. Пентегов І.В. Метод визначення температури дроту на виході її з мундштука при дугової зварки в середі захисних газів / І.В. Пентегов, О.І. Петриєнко // Автоматическа зварка. – 2005. – № 10. – С. 25-28.
6. Пентегов І.В. К аналітичному визначенню основних параметрів режимів механізованої зварки в середі захисних газів / І.В. Пентегов, О.І. Петриєнко // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2006. – № 1. – С. 68-79.
7. Пентегов І.В. Програма автоматизованого розрахунку режимів механізованої зварки сталей в середі захисних газів. / І.В. Пентегов, О.І. Петриєнко. // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2009. – № 3. – С. 158-168.

8. Pentegov I.V. Obliczanie parametrów zmechanizowanego spawania stali w osłonie gazów / I.V. Pentegov, A.S. Pismiennyi, O.I. Petrienko // Przegląd Spawalnictwa. – 2010. – № 7. – P. 33-39.
9. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. / Н.Н. Рыкалин – Москва : Машгиз, 1951. – 297 с.
10. Ленивкин В.А. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах. / В.А. Ленивкин, Н.Г. Дюргеров, Х.Н. Сагиров – Москва: Машиностроение, 1989. – 264 с.
11. Waszink J.H. Heat Generation and Heat Flow in the Filler Metal in GMA Welding / J.H. Waszink, G.J.P.M. van den Heuvel // Welding Journal. – 1982. – V.61, No.8. – P. 269-s – 282-s.
12. Багрянский К.В. Теория сварочных процессов. / К.В. Багрянский, З.А. Добротина, К.К. Хренов – К. : Вища школа, 1976. – 424 с.
13. Походня И.К. Теплосодержание капель электродного металла при сварке в углекислом газе / И.К. Походня, А.М. Суптель // Автоматическая сварка. – 1970. – № 10. – С. 6-8.
14. Modelling and Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding / F. Wang, W.K. Hou, S.J. Hu, E. Kannatey-Asibu, W.W. Schultz, P.C. Wang // Journal of Physics D : Appl. Phys. – 2003. – V. 36, № 9. – P. 1143-1152.
15. Лебедев А.В. Влияние тепловыделения в вылете электрода на процесс саморегулирования дуги / А.В. Лебедев // Автоматическая сварка. – 1978. – № 7. – С. 10-15.
16. Шейнкин М.З. Определение допустимого вылета тонкой электродной проволоки при сварке в углекислом газе / М.З. Шейнкин // Сварочное производство. – 1978. – № 9. – С. 24-28.
17. Патон Б.Е. Управление переносом металла при дуговой сварке плавящимся электродом / Б.Е. Патон, П.П. Шейко // Автоматическая сварка. – 1965. – №5. – С. 1-7.
18. Варуха Е.Н. Расчет скорости плавления электрода при механизированной сварке / Е.Н. Варуха, Р.Я. Докторский // Сварочное производство. – 1991. – № 6. – С. 33-35.
19. Ерохин А.А. Тепловой баланс процесса капельного плавления электродов при дуговой сварке / А.А. Ерохин // Автоматическая сварка. – 1962. – № 12. – С. 24-31.
20. Патон Б.Е. Исследование процесса нагрева электрода при автоматической сварке под флюсом / Б.Е. Патон // Труды по автоматической сварке. – 1948. – № 3. – С. 13-28.
21. Фролов В.В. Теоретические основы сварки. / В.В. Фролов – Москва: Высшая школа, 1970. – 592 с.
22. Потапьевский А.Г. Влияние составляющих режима сварки тонкой проволокой в среде углекислого газа на интенсивность металлургических реакций / А.Г. Потапьевский // Автоматическая сварка. 1958. – № 2. – С. 53-58.
23. Петриенко О.И. Влияние тепловых и электрических процессов на режимы механизированной сварки сталей в защитных газах. Дис. ... канд. техн. наук: 05.03.06 / О.И. Петриенко / Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт" (НТУУ «КПИ»). – 2006. – 176 с.
24. Гудремон Э. Специальные стали. Т.1. / Э. Гудремон – Москва : Металлургия, 1966. – 736 с.
25. Бернштейн М.Л. Металловедение и термическая обработка стали. Справочник. Т.1. / М.Л. Бернштейн, А.Г. Рахштадт – Москва : ГНТИ. – 1961. – 747 с.

Bibliography:

1. Varuha E.N. The Heating and Melting of the Electrode During Arc Mechanized Welding / E.N. Varuha. Thesis of diss. ... doctor of technical sciences: 05.03.06 / Donskoy gosudarstvennyi tehnichestiy univesitet (DGTU). – Rostov on Don: 1998. – 40 p. (Rus.)
2. Pentegov I.V. The Method of Calculating the Voltage Drop on the Length of the Stick-out of the Electrode Taking into Account the Non-Linearity of Thermophysical Parameters / I.V. Pentegov, O.I. Petriienko // Avtomaticheskaya svarka. – 2002. – No.4. – P. 30-33. (Rus.)
3. Pentegov I.V. The Calculation of Temperature Distribution on the Length of the Stick-out of the Electrode, Taking into Account the Heat Coming from the Droplet. / I.V. Pentegov, O.I. Petriienko // Avtomaticheskaya svarka. – 2003. – No.7. – P. 23-28 (Rus.)
4. Determination of Voltage Drop in the Contact Area of the Electrode Wire with a Tip of the Welding Torch for Mechanized Types of Arc Welding / I.V. Pentegov, O.I. Petriienko, S.V. Pustovoyt et al // Avtomaticheskaya svarka. – 2005. – No.6. – P. 12-17. (Rus.)
5. Pentegov I.V. The Method of Determining the Temperature of the Wire on the Outlet of the Tip at

- Arc Welding in Shielding Gases / I.V. Pentegov, O.I. Petriienko // *Avtomaticheskaya svarka.* – 2005. – No.10. – P. 25-28. (Rus.)
6. Pentegov I.V. On The Analytical Determination of Main Parameters of Mechanized Welding Modes in Shielding Gases / I.V. Pentegov, O.I. Petriienko // *Zbirka naukovykh prats NUK.* – Mykolaiv: NUK, 2006. – No.1. – P. 68-79. (Rus.)
 7. Pentegov I.V. The Program of Automated Calculation of Modes of Mechanized Welding of Steels in Shielding Gases. / I.V. Pentegov, O.I. Petriienko // *Zbirka naukovykh prats NUK.* – Mykolaiv: NUK, 2009. – No.3. – P. 158-168. (Rus.)
 8. Pentegov I.V. Obliczanie parametrów zmechanizowanego spawania stali w osłonie gazów / I.V. Pentegov, A.S. Pismiennyi, O.I. Petriienko // *Przegląd Spawalnictwa.* –2010. – № 7. – P.33-39. (Pol.)
 9. Rykalin N.N. Calculations of Thermal Processes in Welding. / N.N. Rykalin – Moskva: Mashgiz, 1951. – 297 p. (Rus.)
 10. Lenivkin V.A. Technological Properties of the Welding Arc in Shielding Gas. / V.A. Lenivkin, N.G. Dyurgerov, H.N. Sagirov – Moskva: Mashinostroenie, 1989. – 264 p (Rus.)
 11. Waszink J.H. Heat Generation and Heat Flow in the Filler Metal in GMA Welding / J.H. Waszink, G.J.P.M. van den Heuvel // *Welding Journal.* – 1982. – V.61, No.8. – P. 269-s – 282-s.
 12. Bagryanskiy K.V. Theory of Welding Processes. / K.V. Bagryanskiy, Z.A. Dobrotina, K.K. Hrenov – Kiev: Vyshcha shkola, 1976. – 424 p. (Rus.)
 13. Pohodnya I.K. Heat Content of the Electrode Metal Droplets during Welding in Carbon Dioxide / I.K. Pohodnya, A.M. Suptel // *Avtomaticheskaya svarka.* – 1970. – No.10. – P. 6-8. (Rus.)
 14. Modelling and Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding / F. Wang, W.K. Hou, S.J. Hu, E. Kannatey-Asibu, W.W. Schultz, P.C. Wang // *Journal of Physics D: Appl. Phys.* – 2003. – V.36, No.9. – P. 1143-1152.
 15. Lebedev A.V. Influence of Heat Release in the Electrode Stick-out in the Self-Regulation Process of the Arc / A.V. Lebedev // *Avtomaticheskaya svarka.* – 1978. – No.7. – P. 10-15. (Rus.)
 16. Sheykin M.Z. Determination of the Allowable Stick-out of Thin Wire Electrode for Welding in Carbon Dioxide / M.Z. Sheykin // *Svarochnoe proizvodstvo.* – 1978. – No.9. – P. 24-28. (Rus.)
 17. Paton B.E. Controlling the Metal Transfer during Arc Welding with Consumable Electrode / B.E. Paton, P.P. Sheyko // *Avtomaticheskaya svarka.* – 1965. – No.5. – P.1-7. (Rus.)
 18. Varuha E.N. The Calculation of the Rate of Electrode Melting at Mechanized Welding / E.N. Varuha, R.Yu. Doktorskiy // *Svarochnoe proizvodstvo.* – 1991. – No.6. – P. 33-35. (Rus.)
 19. Erohin A.A. The Heat Balance of the Process of Drop Melting Electrodes in Arc Welding / A.A. Erohin // *Avtomaticheskaya svarka.* – 1962. – No.12. – P. 24-31. (Rus.)
 20. Paton B.E. Investigation of the Process of Electrode Heating during Automatic Submerged Arc Welding / B.E. Paton // *Trudy po avtomaticheskoy svarke.* – 1948. – No.3. – P. 13-28. (Rus.)
 21. Frolov V.V. Theoretical Basis of Welding. / V.V. Frolov – Moskva: Vysshaya shkola, 1970. – 592 p. (Rus.)
 22. Potapievskiy A.G. Influence of the Components of Welding Modes by Thin Wire in Carbon Dioxide Medium on the Intensity of the Metallurgical Reactions / A.G. Potapievskiy // *Avtomaticheskaya svarka.* 1958. – No.2. – P. 53-58. (Rus.)
 23. Petriienko O.I. Influence of Thermal and Electrical Processes on the Modes of Mechanized Welding of Steels in Shielding Gas. Diss. ... kand. tehn. nauk: 05.03.06 / O.I. Petriienko / *Natsionalnyi tehnichestkiy universitet Ukrainy "Kievskiy politehnichestkiy institut" (NTUU "KPI").* – 2006. – 176 p. (Rus.)
 24. Houndremont E. Handbuch der Sonderstahlkunde. Band 1. / E. Houndremont – Berlin: Springer-Verlag 1956. – 736 s. (Ger.)
 25. Bernshtein M.L. Metallurgy and Heat Treatment of Steel. Handbook. V.1. / M.L. Bernshtein, A.G. Rahshadt – Moskva: GNTI. – 1961. – 747 p. (Rus.)

Рецензент: А.Д. Размышляев
д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 19.03.2012