ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ДВУХМЕРНОЙ ПОСТАНОВКЕ ПРОЦЕССА КАПЛЕОБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОДА ПРИ СВАРКЕ

СУВОРОВ С. В., ВАХРУШЕВ А. В.

Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения РАН,
426067, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34

АННОТАЦИЯ. Работа посвящена численному моделированию в двухмерной постановке процесса каплеобразования плавящегося электрода в условиях воздействия на него электрической дуги в процессе сварки. Необходимость моделирования в двухмерной постановке связана с допущением, что тепловой поток, создаваемый электросварочной дугой, распределен по торцу электрода согласно с нормальным законом распределения вероятности Гаусса. Так же математическая модель включала в себя учет процессов плавления и кипения материала электрода. Проведенные исследования позволили установить характер распределения температур по электроду и зоны плавления электрода в зависимости от интенсивности теплового потока, создаваемого электросварочной дугой. Кроме того, было проведено сравнение результатов моделирования задачи каплеобразования электрода в одно- и двухмерной постановках.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сварка, электрод, численное моделирование, теплопроводность, плавление, кипение.

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] с учетом сделанных в ней допущений исследовался процесс каплеобразования электрода при электродуговой сварке методом численного моделирования в одномерной постановке. Следует отметить, что численное моделирование процесса каплеобразования включало в себя этапы нагрева и плавления, а заканчивалось на закипании материала электрода. Исследования, проведенные в [1], позволили установить основные параметры процесса каплеобразования электрода, а именно распределение температуры по длине электрода, размер зоны расплава электрода и время, проходящее от момента начала электродуговой сварки до закипания материала электрода. Тем не менее, сделанное в [1] допущение о том, что тепловой поток, создаваемый электросварочной дугой, равномерно распределен по торцу электрода, применимо лишь для электродов малого диаметра. В более общей постановке величина теплового потока, создаваемого электросварочной дугой, изменяется от центра торца электрода к его периферии.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Уточним допущения, сделанные в [1] при моделировании процесса каплеобразования на конце электрода:

- теплообмен между защитным газом и электродом отсутствует;
- тепловое расширение материала электрода отсутствует;
- электрод имеет цилиндрическую форму;
- тепловой поток, создаваемый электросварочной дугой, распределен по торцу электрода согласно с нормальным законом распределения вероятности Гаусса [2];
- в расплавленной части электрода число Рейнольдса стремится к нулю ($Re \rightarrow 0$);
- расчет ведется до момента закипания материала электрода.

С учетом допущений о цилиндрической форме электрода и распределении теплового потока по торцу электрода, согласно с нормальным законом распределения вероятности Гаусса, процесс теплопроводности в самом электроде может быть описан в двухмерной, осесимметричной постановке.

Расчетная область нагреваемой части электрода схематично изображена на рис. 1. Следует отметить, что ось $0x$ совпадает с осью симметрии электрода (цилиндра).

Рис. 1. Расчетная область

В таком случае, учитывая [3 – 5], процесс разогрева электрода описывается следующей математической моделью теплопроводности:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = k \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + k \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) + \gamma \cdot j^2 - \dot{m}_m \Delta H_m - \dot{m}_b \Delta H_b, \quad \begin{cases} 0 \leq x \leq l_\infty \\ 0 \leq r \leq r_e \end{cases}, \quad (1)$$

где r – пространственная координата; r_e – радиус электрода; значения остальных переменных и констант соответствуют [1].

Допущение о том, что число Рейнольдса в расплавленном участке электрода стремится к нулю, приводит к тому, что процесс конвективного теплообмена в расплавленном участке в целом не влияет на процесс теплопроводности в электроде.

Граничные и начальные условия, с учетом введенных допущений, будут определяться следующими соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} -k \frac{\partial T(0, r, \tau)}{\partial x} &= q(0, r), \quad \begin{cases} 0 \leq \tau \leq \tau_1 \\ 0 \leq r \leq r_e \end{cases} \\ -k \frac{\partial T(l_\infty, r, \tau)}{\partial x} &= 0, \quad \begin{cases} 0 \leq \tau \leq \tau_1 \\ 0 \leq r \leq r_e \end{cases} \\ -k \frac{\partial T(x, 0, \tau)}{\partial x} &= 0, \quad \begin{cases} 0 \leq \tau \leq \tau_1 \\ 0 \leq x \leq l_\infty \end{cases} \\ -k \frac{\partial T(x, r_e, \tau)}{\partial x} &= 0, \quad \begin{cases} 0 \leq \tau \leq \tau_1 \\ 0 \leq x \leq l_\infty \end{cases} \\ T(x, r, 0) &= 293 \text{ K} \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где $q(0, r)$ – тепловой поток, создаваемый электросварочной дугой и распределенный по торцу электрода согласно с нормальным законом распределения вероятности Гаусса; τ_1 – момент времени начала кипения материала электрода.

Процессы плавления и кипения материала электрода моделировались в соответствии с зависимостями, приведенными в [1] согласно [5]. Значение обозначений в системе уравнений (3) приемственно из [1]:

$$\left. \begin{aligned} \rho(\partial Y_m / \partial \tau) &= \dot{m}_m; \quad \dot{m}_m = (c \rho \Delta T_m) / \Delta H_m \\ \Delta T_m &= \begin{cases} 0, \text{ если } T(\tau + \Delta \tau) < T_m \\ [T(\tau + \Delta \tau) - T_m(\tau)] / \Delta \tau, \text{ если } T(\tau + \Delta \tau) > T_m \end{cases} \\ T_m(\tau) &= \max(T(\tau), T_m) \\ \rho(\partial Y_b / \partial \tau) &= \dot{m}_b; \quad \dot{m}_b = (c \rho \Delta T_b) / \Delta H_b \\ \Delta T_b &= \begin{cases} 0, \text{ если } T(\tau + \Delta \tau) < T_b \\ [T(\tau + \Delta \tau) - T_{bn}(\tau)] / \Delta \tau, \text{ если } T(\tau + \Delta \tau) > T_b \end{cases} \\ T_{bn}(\tau) &= \max(T(\tau), T_b) \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

Материал электрода, а следовательно, и числовые значения соответствующих теплофизических свойств материала, приведенных в соотношениях (1) – (3), совпадают с указанными в [1].

Плотность тока определяется следующим соотношением:

$$\left. \begin{aligned} j &= \frac{I}{S} \\ S &= 0,25 \pi d^2 \\ d &= 2 r_e \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где I – сила тока сварочной дуги; S – площадь поперечного сечения электрода; d – диаметр электрода.

Распределение теплового потока по торцу электрода согласно с нормальным законом распределения вероятности Гаусса, определялось соотношениями, приведенными в работах [2] и [6]:

$$\left. \begin{aligned} q_{\max} &= \frac{\lambda}{\pi} \eta U I \\ q(0, r) &= q_{\max} \cdot \exp(-\lambda r^2), \quad 0 \leq r \leq r_e \\ \lambda &= 4 d^{-2} \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

где $q_{\max}$ – максимальное значение теплового потока, создаваемого электросварочной дугой; η – КПД преобразования электрической мощности сварочной дуги в тепловую; U – напряжение сварочной дуги; λ – коэффициент сосредоточенности сварочной дуги.

Числовые значения величин η , d , λ , $U_{\min}$, $U_{\max}$, $I_{\min}$, $I_{\max}$ соответствуют приведённым в [1].

В табл. 1 приведены значения максимального теплового потока сварочной дуги, рассчитанные по соотношению (5) для четырех комбинаций напряжения и силы тока сварочной дуги.

Таблица 1

Тепловой поток сварочной дуги

Максимальное значение теплового потока сварочной дуги	$\frac{\lambda}{\pi} \eta U_{\min} I_{\min}$	$\frac{\lambda}{\pi} \eta U_{\max} I_{\min}$	$\frac{\lambda}{\pi} \eta U_{\min} I_{\max}$	$\frac{\lambda}{\pi} \eta U_{\max} I_{\max}$
$q_{\max}$, Дж/(м ² ·с)	$9,626 \cdot 10^7$	$1,925 \cdot 10^8$	$2,674 \cdot 10^8$	$5,348 \cdot 10^8$

Задачу теплопроводности (1) с начальными и граничными условиями (2) решаем, применяя метод контрольных объемов [7], название метода в отечественной литературе – интегро-интерполяционный [8].

Дискретный аналог математической модели (1) реализован в явной схеме, как следствие, шаг по времени ограничен сверху:

$$\Delta\tau < 0,5 \cdot \min\left(\frac{c \rho \Delta x_{\min}^2}{2k}, \frac{c \rho \Delta r_{\min}^2}{2k}\right), \quad (6)$$

где $\Delta x_{\min}$, $\Delta r_{\min}$ – наименьшие размеры контрольного объема во всей расчетной области.

Расчет ведется при следующих параметрах дискретизации расчетной области:

– по оси $0r$ расчетная область разбивается на контрольные объемы равных размеров, $\Delta r = 10^{-5}$ м;

– по оси $0x$ размеры контрольных объемов последовательно увеличиваются от $\Delta x_0 = 10^{-5}$ м до $\Delta x_{\max} = 10^{-4}$ м, подчиняясь соотношению:

$$\Delta x_0 \leq \Delta x_i = \Delta x_0 \cdot z^{i-1} \leq \Delta x_{\max}, \quad (7)$$

где $z = 1,01$ – знаменатель геометрической прогрессии. Таким образом, размеры контрольных объемов увеличиваются по мере их удаления от торца электрода в его глубину и при достижении максимально возможного размера, ограничиваемого условием $\Delta x_i \leq \Delta x_{\max}$, размеры контрольных объемов не меняются и далее расчетная область дискретизируется контрольными объемами равных размеров;

– границы контрольных объемов располагаются посередине между узловыми точками контрольных объемов [7].

Примененный подход с контрольными объемами, размеры которых неравномерны вдоль оси $0x$, позволил сократить расходы машинного времени на моделирование процесса.

Контрольный объем с наименьшим размером является «половинным», то есть:

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_{\min} &= 0,5 \Delta x_0 \\ \Delta r_{\min} &= 0,5 \Delta r \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

Из описанных параметров дискретизации расчетной области следует, что $\Delta x_{\min} = \Delta r_{\min} = 5 \cdot 10^{-6}$ м.

Подставляя значение $\Delta x_{\min}$ и $\Delta r_{\min}$ в (6) определим, что шаг по времени не должен превышать: $\Delta\tau < 6,09 \cdot 10^{-7}$ с.

Примем шаг по времени равным $\Delta\tau = 5,0 \cdot 10^{-7}$ с.

Размеры расчетной области, определяемые величинами l_{∞} и r_e , примем равными $l_{\infty} = 25 \cdot 10^{-3}$ м, а согласно (4) $r_e = 0,5d = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Графическое представление результатов моделирования приведено на рис. 1 – 4.

Из графиков на рис. 1 следует, что, как и в случае задачи прогрева электрода в одномерной постановке [1], градиент температуры в электроде пропорционален величине теплового потока, поступающего через торец электрода. Однако, ввиду значительного снижения величины теплового потока, создаваемого электросварочной дугой от центра к периферии электрода, в момент закипания материала электрода, в его центре, на краях торца электрода температура может не достигнуть даже температуры плавления.

По мере увеличения максимального значения теплового потока, создаваемого электросварочной дугой, растет неравномерность распределения температур по электроду, что следует из рис. 1 и 2. Это можно объяснить как неравномерностью теплового потока, поступающего через торец электрода, так и тем, что с увеличением максимального значения теплового потока уменьшается время, необходимое для нагрева материала электрода до закипания и, как следствие, тепло в меньшей степени перераспределяется от разогретого центра электрода к его периферии.

Рис. 1. Профили температур по длине электрода при различных значениях теплового потока сварочной дуги
 в узловых точках вдоль координатной линии $r = 0$: 1 – $q_{\max} = 9,626 \cdot 10^7$, Дж/(м²·с); 2 – $q_{\max} = 1,925 \cdot 10^8$, Дж/(м²·с); 3 – $q_{\max} = 2,674 \cdot 10^8$, Дж/(м²·с); 4 – $q_{\max} = 5,348 \cdot 10^8$, Дж/(м²·с);
 в узловых точках вдоль координатной линии $r = r_e$: 5 – $q_{\max} = 9,626 \cdot 10^7$, Дж/(м²·с); 6 – $q_{\max} = 1,925 \cdot 10^8$, Дж/(м²·с); 7 – $q_{\max} = 2,674 \cdot 10^8$, Дж/(м²·с); 8 – $q_{\max} = 5,348 \cdot 10^8$, Дж/(м²·с)

Рис. 2. Распределение поля температур в электроде в момент закипания (числовые значения изолиний указаны в градусах Кельвина)
 а) – $q_{\max} = 9,626 \cdot 10^7$, Дж/(м²·с); б) – $q_{\max} = 5,348 \cdot 10^8$, Дж/(м²·с)

Как видно из графиков рис. 3, время, необходимое для нагрева материала электрода до его закипания, сильно зависит от величины теплового потока, создаваемого электросварочной дугой. Горизонтальные участки графиков рис. 3 при значениях температуры 1800 К и 3145 К характеризуют соответственно плавление и закипание материала электрода.

Рис. 3. Изменение температуры на поверхности торца электрода при различных значениях теплового потока сварочной дуги в узловой точке с координатами (0, 0): 1 – $q_{\max} = 9,626 \cdot 10^7$, Дж/(м²·с); 2 – $q_{\max} = 1,925 \cdot 10^8$, Дж/(м²·с); 3 – $q_{\max} = 2,674 \cdot 10^8$, Дж/(м²·с); 4 – $q_{\max} = 5,348 \cdot 10^8$, Дж/(м²·с); в узловой точке с координатами (0, r_e): 5 – $q_{\max} = 9,626 \cdot 10^7$, Дж/(м²·с); 6 – $q_{\max} = 1,925 \cdot 10^8$, Дж/(м²·с); 7 – $q_{\max} = 2,674 \cdot 10^8$, Дж/(м²·с); 8 – $q_{\max} = 5,348 \cdot 10^8$, Дж/(м²·с)

На рис. 4 изображены границы расплавленной части электрода при различных значениях величины теплового потока. Каплю образует расплавленная часть электрода.

Рис. 4. Границы расплавленного материала электрода
1 – $q_{\max} = 9,626 \cdot 10^7$, Дж/(м²·с); 2 – $q_{\max} = 1,925 \cdot 10^8$, Дж/(м²·с);
3 – $q_{\max} = 2,674 \cdot 10^8$, Дж/(м²·с); 4 – $q_{\max} = 5,348 \cdot 10^8$, Дж/(м²·с)

Как и в одномерном случае [1], размер зоны расплава электрода обратно пропорционален величине теплового потока, создаваемого электросварочной дугой, что и следует из рис. 4. Также из рис. 4 следует, что глубина зоны расплава вдоль центра электрода может существенно отличаться от глубины зоны расплава на периферии электрода.

В табл. 2 приведены результаты численного моделирования процесса каплеобразования электрода при сварке в одно- и двухмерной постановке и проведено их сравнение.

Таблица 2

Результаты моделирования процесса каплеобразования электрода в одно- и двухмерной постановке

Максимальное значение теплового потока, Дж/(м ² ·с)	$9,626 \cdot 10^7$	$1,925 \cdot 10^8$	$2,674 \cdot 10^8$	$5,348 \cdot 10^8$
Время разогрева до начала кипения в одномерной постановке, с	0,15640	0,0418	0,0226	0,0062
Время разогрева до начала кипения в двухмерной постановке, с	0,26348	0,0518	0,0261	0,00695
Отношение времени разогрева до начала кипения в двухмерной постановке к одномерной	1,68	1,24	1,15	1,12
Максимальная глубина зоны расплава электрода в одномерной постановке, мм	0,84	0,445	0,335	0,177
Максимальная глубина зоны расплава электрода в двухмерной постановке, мм	0,88	0,438	0,328	0,178
Отношение максимальной глубины зоны расплава электрода в двухмерной постановке к одномерной	1,04	0,98	0,98	1,006

Значения, приведенные в табл. 2, показывают, что время разогрева до начала кипения материала электрода в двухмерной постановке больше, чем в одномерной, что объясняется перераспределением тепла от разогретого центра электрода к его периферии, этот эффект тем сильнее, чем меньше тепловой поток, создаваемый электросварочной дугой.

Также следует заметить, что максимальная глубина зоны расплава электрода в двухмерной постановке почти не отличается от глубины зоны расплава в одномерной постановке, а разница в результатах глубины зоны расплава электрода может быть объяснена применением различных способов дискретизации. В одномерной постановке применялась равномерная сетка, а в двухмерной постановке – неравномерная сетка.

ВЫВОДЫ

Моделирование теплопроводности в электроде в двухмерной постановке позволило существенно дополнить картину процесса каплеобразования в материале электрода во время электродуговой сварки.

Степень неравномерности распределения температур по электроду пропорциональна величине максимального значения теплового потока, создаваемого электросварочной дугой.

При моделировании задачи каплеобразования электрода с одинаковыми величинами максимального значения теплового потока в одно- и двухмерной постановках, время разогрева до начала кипения материала электрода в двухмерной постановке больше, чем в одномерной, что объясняется перераспределением тепла от разогретого центра электрода к его периферии. Этот эффект тем сильнее, чем меньше тепловой поток, создаваемый электросварочной дугой.

Максимальная глубина зоны расплава электрода в двухмерной постановке почти не отличается от одномерной постановки, однако в двухмерной постановке проявляется существенная неравномерность в распределении зоны расплава электрода.

В целом можно заключить, что введение допущения о том, что тепловой поток, создаваемый электросварочной дугой, распределен по торцу электрода согласно с нормальным законом распределения вероятности Гаусса, позволяет более точно описать процессы, протекающие в электроде при электродуговой сварке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суворов С. В., Вахрушев А. В. Численное моделирование процесса каплеобразования электрода при сварке // Химическая физика и мезоскопия. 2018. Т. 20, № 3. С. 335-341.
2. Васильев К. В., Вилль В. И., Волченко В. Н. и др. Сварка в машиностроении. Справочник в 4 т. / под ред. Н.А. Ольшанского. М.: Машиностроение, 1979. Т. 1. 504 с.
3. Карслоу Г. Егер Д. Теплопроводность твердых тел / пер. со второго англ. издания, под ред. А.А. Померанцева. М.: Наука, 1964. 488 с.
4. Пентегов И. В., Письменный А. С., Петриенко О. И., Сидорец В. Н., Рымар С. В., Жерносеков А. М., Петриенко Л. П. Сравнение аналитического и численного методов расчета режимов механизированной сварки в среде защитных газов // Вестник приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2012. № 24. С. 196-204.
5. Липанов А. М., Макаров С. С., Карпов А. И., Макарова Е. В. Численное исследование охлаждения высокотемпературного металлического цилиндра потоком газожидкостной среды // Теплофизика и аэромеханика. 2017. Т. 24, № 1(103). С. 53-60.
6. Кректулева Р. А., Батралин А. В. Совместное решение обратной задачи теплопроводности и задачи оптимального проектирования в технологии сварки неплавящимся электродом // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 320, № 2. С. 104-109.
7. Патанкар С. В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / пер. с англ., под ред. В.Д. Виленского. М.: Энергоатомиздат, 1984. 150 с.
8. Самарский А. А. Введение в теорию разностных схем. М.: Наука, 1971. 552 с.

NUMERICAL MODELING IN A TWO-DIMENSIONAL STATEMENT OF THE PROCESS OF DROPSHIP OF ELECTRODE AT WELDING

Suvorov S. V., Vakhrushev A. V.

Udmurt Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Science, Izhevsk, Russia

SUMMARY. The work is devoted to numerical modeling in two-dimensional formulation of the process of droplet formation of a melting electrode under the influence of an electric arc in the welding process. The need for modeling in two-dimensional formulation is associated with the assumption that the heat flux generated by the electric arc is distributed along the electrode end face according to the normal Gauss probability distribution law. Also, the mathematical model included accounting for the melting and boiling of the electrode material. The carried out researches allowed to establish character of distribution of temperatures on an electrode and a zone of melting of an electrode depending on intensity of a heat flux created by an electric welding arc. In addition, the results of modeling the problem of electrode droplet formation in one - and two-dimensional formulation were compared.

KEYWORDS: welding, electrode, numerical modeling, thermal conductivity, melting, boiling.

REFERENCES

1. Suvorov S. V., Vakhrushev A. V. Chislennoe modelirovanie protsessa kapleobrazovaniya elektroda pri svarke [Numerical modeling of the process of dropship of electrode at welding]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2018, vol. 20, no. 3, pp. 335-341.
2. Vasil'ev K. V., Vill' V. I., Volchenko V. N. i dr. *Svarka v mashinostroenii* [Welding in mechanical engineering]. *Spravochnik v 4 t.* / pod red. N.A. Ol'shanskogo. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1979. Vol. 1. 504 p.
3. Carslaw H. S., Jaeger J. C. *Conduction of heat in solids*. Second Ed. Oxford, Clarendon Press, 1959. 517 p.
4. Pentegov I. V., Pis'mennyy A. S., Petrienko O. I., Sidorets V. N., Rymar S. V., Zhernosekov A. M., Petrienko L. P. Sravnenie analiticheskogo i chislennoy metodov rascheta rezhimov mekhanizirovannoy svarki v srede zashchitnykh gazov [Comparison of Analytical and Numerical Methods for Calculating the Modes of Mechanized Welding in Shielding Gases]. *Vestnik priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Reporter of the Priazovskiy State Technical University. Section: Technical sciences], 2012, no. 24, pp. 196-204.
5. Lipanov A. M., Makarov S. S., Karpov A. I., Makarova E. V. Simulation study of a hot metal cylinder cooling by gas-liquid flow. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2017, vol. 24, no. 1, pp. 53-60. <https://doi.org/10.1134/S0869864317010061>
6. Krektuleva R. A., Batranin A. V. Sovmestnoe reshenie obratnoy zadachi teploprovodnosti i zadachi optimal'nogo proektirovaniya v tekhnologii svarki neplavyashchimsya elektrodom [The joint solution of the inverse heat conduction problem and optimal design problems in the technology of non-consumable electrode welding]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University], 2012, vol. 320, no. 2, pp. 104-109.
7. Patankar S. V. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. New York, Hemisphere Publ., 1980. 197 p.
8. Samarskiy A. A. *Vvedenie v teoriyu raznostnykh skhem*. Moscow: Nauka Publ., 1971. 552 p.

Суворов Степан Валентинович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, УдмФИЦ УрО РАН, e-mail: ssv.82@mail.ru

Вахрушев Александр Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией механики наноструктур УдмФИЦ УрО РАН, тел. (3412) 21-45-83, e-mail: vakhrushev-a@yandex.ru