

УДК 621.791

СОПРЯЖЕННЫЕ ЗАДАЧИ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОЙ СВАРКЕ МЕТАЛЛОВ

Г.Д. Кабаева, Р.Т. Султангазиева, Б.Н. Медралиева

Приведены результаты расчетов для аргонодуговой сварки на основе предложенной расчетной схемы. Дана математическая модель с использованием системы МГД уравнений.

Ключевые слова: аргонодуговая сварка; плазменная сварка; математическое моделирование; сопряженные задачи теплообмена.

CONJUGATED PROBLEMS OF HEAT EXCHANGE AT THE PLASMA-ARC WELDING OF METALS

G.D. Kabaeva, R.T. Sultangazieva, B.N. Medralieva

It is given results of calculations for argon-arc welding on the basis of the offered analytical model. It is given the mathematical model with use of system of MHD equations.

Keywords: argon-arc welding; plasma welding; mathematical modeling; conjugated problems of heat exchange.

Как известно, сварка является одной из наиболее востребованных технологий практически во всех отраслях промышленной деятельности развитых стран, и исследование сварочных процессов необходимо для решения вопросов повышения технологических показателей, при создании сварных конструкций, отвечающих требованиям качественного соединения. Наиболее распространенными видами сварки являются аргонодуговая и плазменно-дуговая, при которых источником нагрева служит электрическая дуга с разной интенсивностью плазмообразования и соответственно концентрацией потока энергии. Высокая сложность, ресурсоемкость и трудности проведения натурных исследований сварочных процессов делают предпочтительными методы математического моделирования, позволяющими реализовать многократный вычислительный эксперимент. Кроме того, становится необходимой предварительная математическая оценка физических процессов основного цикла изготовления изделия на стадии технологической подготовки [1, 2].

Начиная с первых теоретических работ по изучению тепловых процессов при сварке и резке Н.Н. Рыкалина и D.Rosenthal, посвященных установлению закономерностей нагрева в зависимости от мощности источника энергии, основной

целью исследований процессов при сварке электрической дугой, продолжает оставаться определение основных зависимостей тепловой эффективности процесса и качества формируемого шва от энергетических и технологических характеристик источника энергии и управление ими [1–16]. При этом рассматриваются следующие вопросы: 1) повышение проплавляющей способности сварочной дуги; 2) влияние состава рабочего и защитного газа, режима горения дуги на тепловое и силовое воздействие дуговой плазмы и процессы в сварочной ванне (увеличение проплавляющей способности дуговой плазмы и в то же время свариваемости, т.е. качества шва); 3) механизмы и кинетические процессы при формировании шва, влияние характеристик дуги, ее рабочих параметров и сварочных материалов на формирование и структуру шва при сварке.

Изучение совокупности всех физических явлений при плазменно-дуговой сварке металлов приводит к необходимости одновременного определения физических параметров: в потоке дуговой плазмы; в расплавленном металле; в зонах кристаллизации, структурных превращений и термического влияния, то есть к постановке сопряженных задач теплообмена, термоупругости и концентрационной упругости. Этот подход ши-

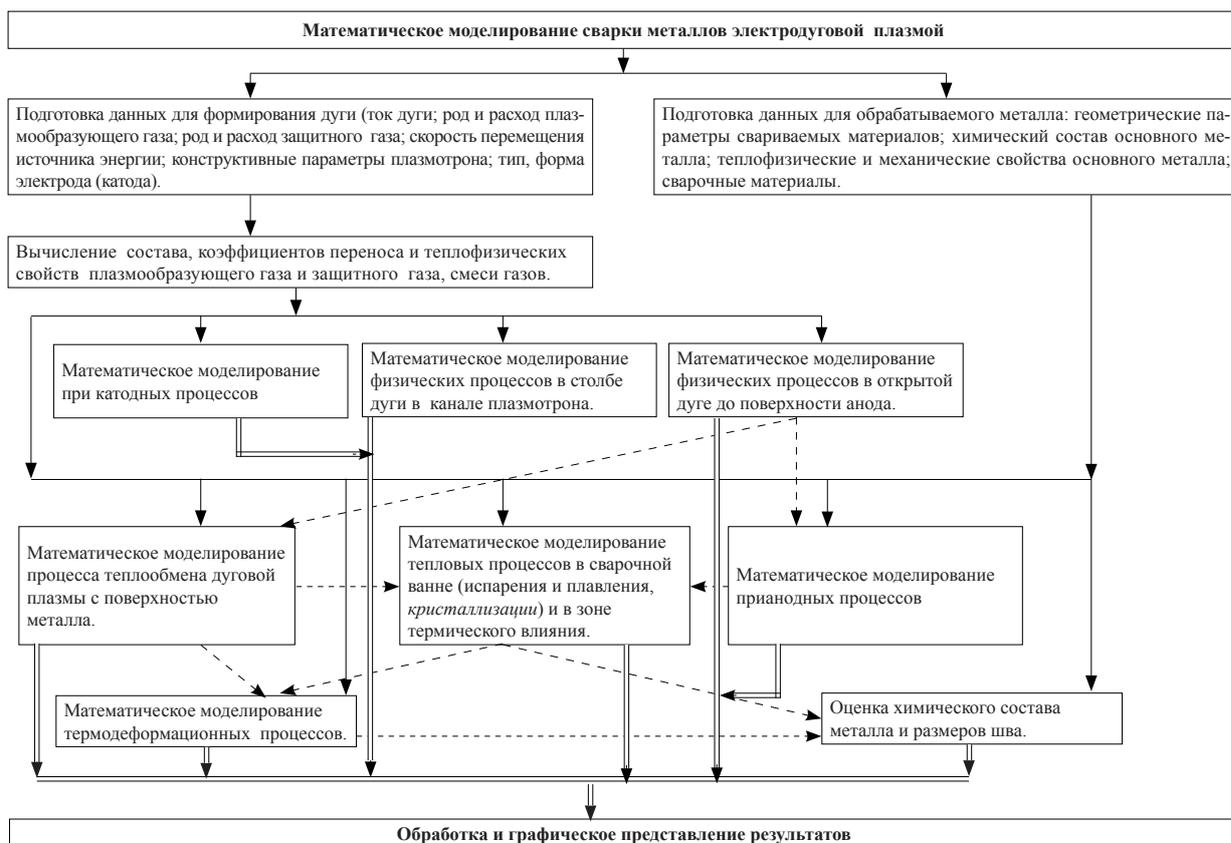


Рисунок 1 – Математические модели плазменной сварки металлов

роко применяется при решении сложных задач, имеющих конкретное технологическое приложение, когда решаются задачи нестационарного теплообмена и фазовых превращений в системе тел, обладающих различными свойствами. Важной особенностью сопряженных задач является возможность их автономного решения, что упрощает их реализацию [17].

На рисунке 1 представлена схема всей совокупности задач, решаемых при исследовании плазменно-дуговой сварки металлов.

Для приведенных на схеме задач моделирования по отдельности известны решения при различных постановочных условиях [18]. Сопряженная их постановка позволяет развивать известные модели для технологических задач, таких как сварка и рез-

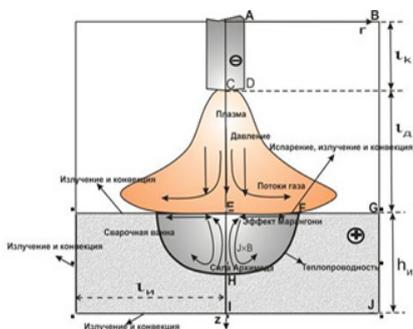


Рисунок 2 – Схема расчетной области дуговой сварки в инертных газах

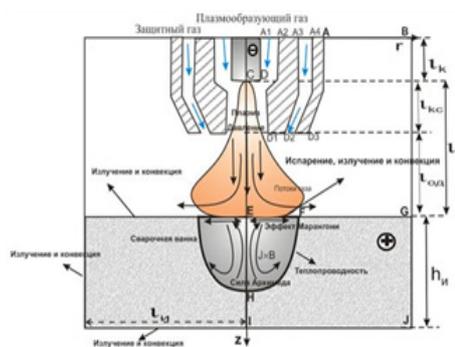


Рисунок 3 – Схема плазменной сварки металлов

Таблица 1 – Значения коэффициентов обобщенного уравнения (1)

Уравнение	α	Φ	Γ_Φ	S_Φ
Неразрывности	1	1	0	0
Движения	1	u	μ	$= -\frac{\partial P}{\partial z} + j_r B_\phi + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu r \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{2}{3} \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v r}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right) + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + S_u$
		v	μ	$-\frac{\partial P}{\partial r} - j_z B_\phi + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu r \frac{\partial v}{\partial r} \right) - 2 \mu \frac{v}{r^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{2}{3} \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (rv)}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right)$
Энергии	1	h	1	$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial h}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{1}{\sigma} (j_r^2 + j_z^2) + S_h$

ка. С технологической точки зрения определения взаимосвязи *источник энергии – процесс сварки*, наиболее информативным представляется рассмотрение взаимодействия *открытая дуга – сварочная ванна* и во многих работах его описание выполняется на основе единой системы МГД уравнений, записываемой для всей рассматриваемой области [8–17]. При этом схема расчетной области, за исключением небольших отличий в катодной области, в основном, имеет вид, представленный на рисунке 2.

Плазменная сварка в отличие от аргонодуговой обеспечивает более глубокое проплавление, меньшую ширину шва и характеризуется более высоким давлением дуги на сварочную ванну [3]. Обеспечиваются эти условия тем, что устройства для плазменной сварки оснащены соплом, в котором подача рабочего и защитного газа выполняется раздельно. Процесс может осуществляться с применением присадочной проволоки или без нее. Для плазменно-дуговой сварки расчетная область имеет более сложный, с позиции граничных условий, вид (рисунок 3).

В данной работе приведены результаты расчетов для аргоно-дуговой сварки на основе представленной расчетной схемы (рисунок 2), по модели, предложенной в работе [19], которая может быть развита для более сложной расчетной области плазменно-дуговой сварки металлов. Рассматриваются: электромагнитные и термодинамические явления в электрической дуге; объемное излучение и его абсорбция на поверхности металла; плавление, парообразование в изделии; течение расплавленного металла и газа, взаимодействующие на свободных поверхностях; поверхностные явления: градиент поверхностного натяжения и эффект Марангони, конвекция, имеющие сильное влияние на форму и глубину ванны.

При записи МГД уравнений предполагается, что в дуговом разряде выполняются следующие ус-

ловия: среда является сплошной, между скоростью деформации и напряжением существует линейная связь, течение газа ламинарное, выполняется условие локального термодинамического равновесия, излучение ионизированного газа объемное.

Для сварочной ванны принимаются следующие допущения: установившийся режим точечной сварки с неплавящимся электродом в замкнутом объеме, течения ламинарные. Система МГД уравнений записывается в цилиндрической системе координат (r, z, ϕ), $\partial/\partial\phi = 0$ для случая, когда нет внешней закрутки газа, не наложено внешнее магнитное поле.

Уравнения можно представить в обобщенном виде для сокращения их записи, а также для удобства составления разностного алгоритма [20]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z} (\rho u \alpha \Phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho v r \alpha \Phi) = \\ = \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + S_\Phi. \end{aligned} \quad (1)$$

Уравнения Максвелла:

$$\frac{\partial E_r}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial r} = 0, \quad \frac{1}{r} \frac{\partial r H_\phi}{\partial r} = j_z, \quad \frac{\partial H_\phi}{\partial z} = j_r.$$

Закон Ома:

$$j_r = \sigma E_z, \quad j_z = \sigma E_r.$$

Система (1) дополняется зависимостями теплофизических коэффициентов плазмообразующего газа и расплавленного металла изделия:

$$\begin{aligned} \rho = \rho(T, P), \sigma = \sigma(T, P), \lambda = \\ = \lambda(T, P), \mu = \mu(T, P), c_p = \\ = c_p(T, P), h = h(T, P), \psi = \psi(T, P). \end{aligned}$$

Здесь v – радиальная скорость; u – аксиальная скорость; P – давление; T – температура; j – плот-

Таблица 2 – Граничные условия для дуги

	ω	ψ	h, T	χ
AB	$u=0$ $v=0$	$\psi=0$	$T = T_0$	$\chi = \frac{I}{2\pi}$
AD	$u=0$ $v=0$	$\frac{\partial\psi}{\partial r} = 0$	$T = T_0$	$\chi = \frac{I}{2\pi}$
CD	$u=0$ $v=0$	$\frac{\partial\psi}{\partial z} = 0$ $\psi=0$	$T = T_k(r)$	$\chi = \chi_k$
CE	$\frac{\partial\omega}{\partial r} = 0$	$\psi=0$	$\frac{\partial T}{\partial r} = 0$	$\chi = 0$
BG	$u=0$ $v=0$	$\psi=0$	$T = T_0$	$\chi = \frac{I}{2\pi}$
EF	-	$\psi=0$	$\lambda_{\text{дуги}} \frac{\partial T_{\text{дуги}}}{\partial z} = \lambda_a \frac{\partial T_a}{\partial z}$	$\frac{\partial\chi}{\partial z} = 0$

Таблица 3 – Граничные условия для сварочной ванны

	ω	ψ	h, T	χ
EF	$\mu_p \omega_p = \mu_a \omega_a - \frac{1}{r} \frac{\partial\alpha}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial r}$	$\psi=0$	$\lambda_a \frac{\partial T_a}{\partial z} = \lambda_{\text{дуги}} \frac{\partial T_{\text{дуги}}}{\partial z}$ $-\sigma_\varepsilon \varepsilon (T_a^4 - T_0^4) - W_v h_{fg} - j\varphi_a$	$\frac{\partial\chi}{\partial z} = 0$
FG	$u=0$ $v=0$	$\psi=0$	$\lambda_{\text{дуги}} \frac{\partial T_{\text{дуги}}}{\partial z} = \lambda_a \frac{\partial T_a}{\partial z}$ $-\sigma_\varepsilon \varepsilon (T_a^4 - T_0^4)$	$\frac{\partial\chi_a}{\partial z} = 0$
EI	$\frac{\partial\omega}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial\psi}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial T}{\partial r} = 0$	$\chi = 0$
GJ	$w=0$	$\psi=0$	$\frac{\partial T}{\partial r} = 0$	$\chi = \frac{I}{2\pi}$
IJ	$w=0$	$\psi=0$	$\frac{\partial T}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial\chi}{\partial z} = 0$

ность тока; E – напряженность электрического тока; H – напряженность магнитного поля; ρ – плотность; σ – электропроводность; λ – теплопроводность; μ – вязкость; c_p – теплоемкость при постоянном давлении; h – энтальпия; ψ – излучательная способность.

В уравнении движения:

$$S_v = \begin{cases} 0 & \text{для дуги} \\ \rho g - \rho g \beta (T - T_0) & \text{для ванны} \end{cases} \quad (2)$$

β – коэффициент термического расширения, S_h – источник член, который учитывает потери тепла на плавление.

H_f – удельная энтальпия

$$H_f = \begin{cases} L & T > T_l \\ f_l L & T_s \leq T \leq T_l \\ 0 & T < T_s \end{cases} \quad (3)$$

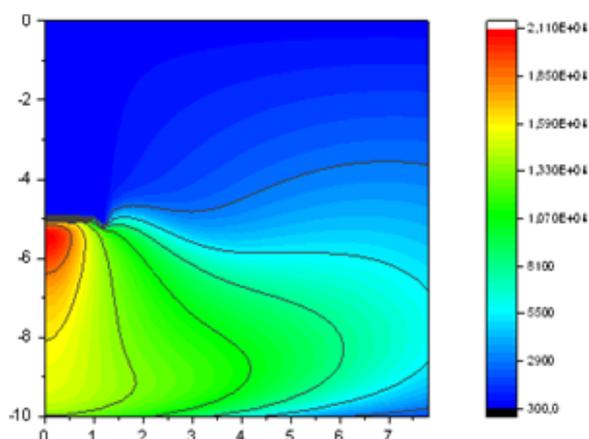


Рисунок 4 – Изолинии температур в сварочной дуге

$$f_L = \begin{cases} 1 & T > T_l \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & T_s < T < T_l, \\ 0 & T < T_s \end{cases} \quad (4)$$

где L – удельная теплота плавления металла анода. В сварочной ванне жидкая фракция f_L меняется линейно от температуры (s – твердая фракция). Энтальпия связана с удельной энтальпией формулой $h = C_p T + f_L H_f$.

Система МГД уравнений (1) решается в переменных “вихрь-функция тока”:

$$\omega = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial u}{\partial r} \right); \quad \frac{\partial \psi}{\partial r} = \rho u r, \quad -\frac{\partial \psi}{\partial z} = \rho v r; \\ \frac{\partial \chi}{\partial r} = r j_z, \quad -\frac{\partial \chi}{\partial z} = r j_r, \quad (5)$$

где ω – напряженность вихря; ψ – функция тока; χ – функция электрического тока. Введенные новые переменные ψ и χ удовлетворяют уравнениям неразрывности и сохранения заряда.

Для решения полученной системы дифференциальных уравнений задаются граничные условия для функций по всему контуру, охватывающему расчетную область. Граничные условия (таблица 2–3) для температуры на поверхности сварочной ванны при электродуговой сварке вольфрамовым неплавящимся катодом примут вид:

$$\lambda_a \frac{\partial T_a}{\partial z} = \lambda_{\text{дву}} \frac{\partial T_{\text{дву}}}{\partial z} - \sigma_\varepsilon \varepsilon (T_a^4 - T_0^4) - W_v h_{fg} - j \varphi_a,$$

где T_a – температура на поверхности анода; T_0 – температура окружающей среды; σ_ε – коэффициент Стефана–Больцмана; ε – излучательная способность вещества; h_{fg} – удельная теплота испарения;

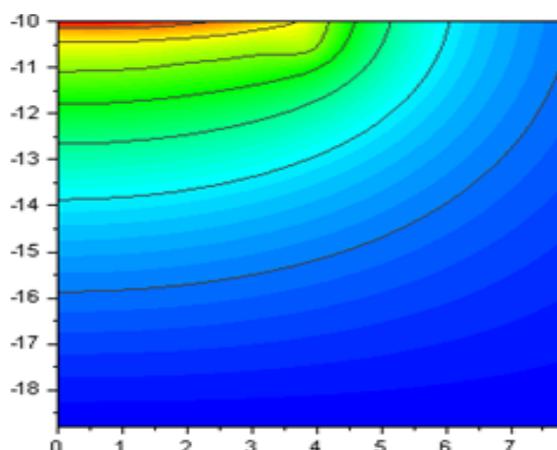


Рисунок 5 – Изотермы сварочной ванны

φ_a – работа выхода для металла анода; W_v – скорость испарения, которая находится из следующего приближения: $\log W_v = A_v + \log P_{\text{атм}} - 0,5 \log T$; A_v – постоянная, зависящая от материала обрабатываемого изделия.

Форма свободной поверхности сварочной ванны определяется из условия баланса внутренних и внешних сил на ее поверхности. На свободной границе дуга – жидкий металл имеют место нормальные напряжения от баланса давления жидкости и сил вязкого трения; баланса капиллярных сил и сил давления дуги в дуге условия сварки, записаны с учетом тензора вязких напряжений. Касательные напряжения: $\mu \frac{\partial v}{\partial z} = -f_L \frac{\partial \alpha}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial r}$, вызваны зависимостью коэффициента поверхностного натяжения расплавленного металла от температуры. Полученная система дискретных уравнений решается комбинацией метода Гаусса – Зейделя.

В качестве примера результатов вычислений, на рисунках 4, 5 приведены изолинии температур в аргоновой дуге и сварочной ванне, в которых представлены результаты вычислений при $I = 150$ А, $P = 0,1$ МПа, при постоянном межэлектродном расстоянии в 5 мм, в качестве материала анода используется алюминий. Размеры дуги у анода формируются в процессе расчета в соответствии с поставленными условиями.

Решение системы МГД уравнений для электрической дуги и сварочной ванны в сопряженной постановке позволяет рассмотреть взаимодействие между собой гидродинамических, температурных и электромагнитных полей, поля напряжений и оценить их вклад в формирование сварочной ванны, и тем самым в формирование сварного шва.

Литература

1. Теория сварочных процессов: учебник для вузов / под ред. В.М. Неровного. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 752 с.
2. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н.Н. Рыкалин. М.: Машгиз, 1954. 296 с.
3. *Rozenthal D.* Mathematical Theory of Heat Distribution During Welding and Cutting / D. Rozenthal // *Welding Journal*. 1941. V. 20. P. 220–234.
4. Influence of shielding gas composition on arc properties in TIG welding / M. Tanaka, S. Tashiro, T. Satoh, A. B. Murphy and J. J. Lowke // *Science and Technology of Welding and Joining*. 2008. Vol. 13. № 3. P. 225–231.
5. *Key F.* Anode Cathode Geometry and Shielding Gas Interrelationships in GTAW / F. Key // *Welding J.* 1980. Vol. 59. P. 364–470.
6. Влияние состава защитного газа и конструкции неплавящегося катода на проплавливающую способность дуги и формирование сварных швов / А.В. Савинов, В.И. Атаманюк, И.Е. Лапин и др. // *Сварочное производство*. 2009. № 12. С. 39–43.
7. Математическая модель давления дуги на сварочную ванну при сварке неплавящимся электродом / А.В. Савинов, И.В. Лапин, В.И. Лысак, О.А. Полеский // *Сварка и диагностика*. 2010. № 2. С. 26–30.
8. Modelling of arc welding: The importance of including the arc plasma in the computational domain / Anthony B. Murphy, Manabu Tanaka B., Kentaro Yamamoto, Shinichi Tashiro, John J. Lowke, Kostya Ostrikov // *Vacuum* 85. 2010. P. 579–658.
9. *Wheeler D., Bailey C.* Numerical modelling and Validation of Marangoni and Surface Tension Phenomena Using the Finite Volume Method / D. Wheeler, C. Baile // *Int. J. Num. Methods in Fluids*, 212-B. 1999.
10. GTAW liquid pool convections and the weld shape variations under helium gas shielding / Wenchao Dong, Shanping Lu, Dianzhong Li, Yiyi Li // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2011. №, 54. 1420–1431.
11. *Lu S.P., Dong W.C., Li D.Z. and Li Y.Y.* Numerical simulation for welding pool and welding arc with variable active element and welding parameters / S.P. Lu, W.C. Dong, D.Z. Li and Y.Y. Li // *Science and Technology of Welding and Joining*. 2009. Vol. 14. N. 6. P. 509–516.
12. *Shanping Lu, Wenchao Dong, Dianzhong Li, Yiyi Li.* Numerical study and comparisons of gas tungsten arc properties between argon and nitrogen / Lu Shanping, Dong Wenchao, Li Dianzhong, Li. Yiyi // *Computational Materials Science* 2009. № 45. P. 327–335.
13. *Mougenot J., Gonzalez J., Fretton P. and Masquère M.* Plasma–weld pool interaction in tungsten inert-gas configuration / J. Mougenot, J. Gonzalez, P. Fretton and M. Masquère // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2013. № 46. P. 135–206.
14. *Delalondre C. and Simonin O.* Modelling of High Intensity Arcs Including a Non-Equilibrium Description of the Cathode Sheath / C. Delalondre and O. Simonin // *Colloq. De Physique*. 15. 1990. Colloque CS. Tome 51. P. 199–206.
15. *Tsai M.C. and Kou S.* Heat Transfer and Fluid Flow in Welding Arcs Produced by Sharpened and Flat Electrodes / M.C. Tsai and S. Kou. // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 1990. Vol. 33. P. 2089–2098.
16. Контракция сварочной дуги с вольфрамовым катодом в смесях инертных газов / П. В. Порицкий, В. П. Прилуцкий, В. Н. Замков // *Автоматическая сварка*. 2005. № 7. С. 3–9.
17. *Солоненко О.П.* Нестационарный сопряженный теплообмен и фазовые превращения при высокоэнергетической обработке поверхности. Часть 2: Моделирование технологических процессов / О.П. Солоненко, А.А. Головин // *Теплофизика и аэромеханика*. 2007. № 4. Т. 14. С. 623–638.
18. Теория столба электрической дуги. Низкотемпературная плазма. Т. 1 / В.С. Энгельшт, В.Ц. Гурович, Г.А. Десятков и др. Новосибирск: Наука. Сиб. отд, 1990. 376 с.
19. *Жайнаков А.Ж.* О влиянии термокапиллярной конвекции на параметры расплавленного электрической дугой металла / А.Ж. Жайнаков, Р.Т. Султангазиева, Дж.О. Усенканов // Докл. III казахст.-росс. научно-практич. конф. “Математическое моделирование научно-технологических и экологических проблем в нефтегазодобывающей промышленности”. Алматы, 2000.
20. *Патанкар С.В.* Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах. / С.В. Патанкар М.: Изд-во МЭИ, 2003. 312 с.