

УДК 621.791.72

**Е.С. Саломатова, Д.Н. Трушников,  
А.И. Цаплин, В.Я. Беленький**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия

## **ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИСПАРЕНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ**

Формирование парогазового канала при электронно-лучевой сварке (ЭЛС) сопровождается достаточно сложными процессами, такими как локальные перегревы металла с последующими взрывообразными вскипаниями (абляцией), стохастическое перемещение зоны взаимодействия пучка электронов с металлом по глубине парогазового канала, периодическое смыкание канала в верхней части, образование волн на поверхности расплава и др. Для описания процесса ЭЛС до последнего времени в основном применяются упрощенные модели, в которых канал проплавления заменяется линейным источником тепла в комбинации с точечным поверхностным источником, расположенным на поверхности свариваемого образца. Такие модели дают удовлетворительное описание картины на некотором удалении, но абсолютно не пригодны для исследования самого парогазового канала. В предлагаемой работе описывается оригинальная методика косвенного измерения давления паров и температуры в парогазовом канале при электронно-лучевой сварке. Эта методика основана на экспериментальном определении концентрации химических элементов в парах над зоной сварки и сопоставлении этих результатов с результатами моделирования. 2D-модель основана на совместном решении уравнений диффузии с учетом тепло- и массопереноса в расплаве. Расчеты производились на вычислительном кластере в пакете прикладного программного обеспечения Comsol Multiphysics с применением технологии параллельных вычислений.

**Ключевые слова:** электронно-лучевая сварка, температура на стенках парогазового канала, термодинамические расчеты, давление паров, диффузия элементов в расплаве, применение параллельных вычислений, тепло-массоперенос в расплаве, экспериментальное определение концентрации химических элементов, программное обеспечение Comsol Multiphysics, определение потерь легирующих компонентов.

**E.S. Salomatova, D.N. Trushnikov,  
A.I. Tsaplin, V.Ya. Belenkiy**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## **THE HIGH PERFORMANCE COMPUTING FOR RESEARCH OF EVAPORATION DURING ELECTRON BEAM WELDING**

The formation of vapor-gas channel in electron beam welding is accompanied by rather complex processes, such as local overheating of the metal followed by explosively Effervescence (ablation), stochastic movement zone of interaction of the electron beam with the metal vapor-gas channel depth, periodic closing of the channel in the upper part, the formation of waves on the surface melt and others.

to describe the process of EBW until recently mainly used simplified models, in which the channel penetration replaced linear heat source in combination with a surface point source located on the surface of the welded sample. Such models provide a satisfactory description of the picture at a certain distance, but it is absolutely not suitable for the study of the vapor-gas channel. In the present paper describes an original technique for indirect measurement of the vapor pressure and temperature in the vapor-gas channel in electron beam welding. This technique is based on an experimental determination of the concentration of chemical elements in the vapor above the welding zone and to compare these results with the simulation results. 2D model is based on the simultaneous solution of diffusion equations with the heat and mass transfer in the melt. The calculations were performed on the computer cluster in the package application software Comsol Multiphysics using the technology of parallel computing.

**Keywords:** electron-beam welding, the temperature on the walls of the vapor-gas channel, thermodynamic calculations, vapor pressure, diffusion of elements in the melt, the use of parallel computing, the heat-mass transfer in the melt, the experimental determination of the concentration of chemical elements, the software Comsol Multiphysics, the definition of loss of alloying components.

## Введение

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) занимает особое место благодаря высокой концентрации мощности в сварочном электронном пучке и его способности глубокого проникновения в металл, что обуславливает ее широкое применение при изготовлении деталей ответственных изделий из различных сплавов. Важным преимуществом является также ведение процесса ЭЛС в вакууме ( $P = 10^{-2}$  Па), что обеспечивает эффективную защиту зоны сварки от воздействия газовой среды.

При воздействии мощного концентрированного электронного пучка на металл давление паров, покидающих зону плавления, деформирует поверхность сварочной ванны, и в расплаве формируется глубокий и узкий парогазовый канал, жидкие стенки которого удерживаются давлением паров металла [1–4]. В парогазовом канале проходит интенсивное испарение материала, что может приводить к снижению концентрации некоторых легирующих элементов в расплавленном металле. Такой процесс имеет место для металлических сплавов, содержащих легкоплавкие легирующие элементы. Поэтому процессы испарения при ЭЛС представляют интерес при разработке теоретических моделей процесса формирования сварного шва [5, 6].

В работе [7] рассмотрены процессы испарения, в которых диффузия примесей в расплаве, протекающая в тонком слое у поверхности парогазового канала, является основным лимитирующим процессом для определения потери легирующих компонентов при ЭЛС. При этом не учитывается зависимость коэффициента диффузии от температуры расплава.

Целью данной работы является построение нелинейной теоретической модели, которая описывает неравновесные процессы в жидкой фазе металла при ЭЛС с учетом процессов испарения химических эле-

ментов со стенок канала, конденсации элементов сплава на стенки парогазового канала и диффузии элементов в расплаве.

### Постановка задачи. Определяющее уравнение и краевые условия

Для построения модели были приняты следующие предположения: форма парогазового канала аппроксимировалась цилиндром; поверхность парогазового канала считалась изотермической, равной температуре окружающей среды; перенос тепла и массы вещества вдоль оси канала считался несущественным; коэффициент диффузии в расплаве принимался зависимым от температуры; истощение расплава легирующими элементами происходило в тонком слое у поверхности парогазового канала; из-за высокого давления в парогазовом канале скорость паров металла на выходе достигала скорости звука.

Таким образом, задача сводилась к двумерной, а расчетная область содержала только жидкую фазу. Для решения задачи был использован численный метод, позволяющий учесть процессы испарения, конденсации и диффузии элементов в расплаве. Расчетная схема представлена на рис. 1.

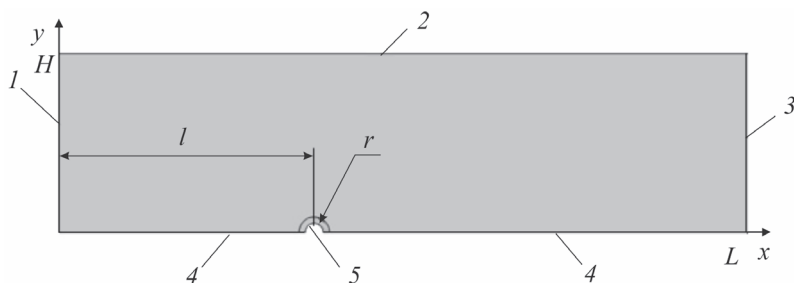


Рис. 1. Расчетная схема: 1 – входная граница; 2 – боковая граница; 3 – выходная граница; 4 – ось симметрии; 5 – парогазовый канал

Система уравнений, описывающая процессы испарения при ЭЛС, включает уравнение переноса импульса (уравнение Навье – Стокса)

$$(\vec{U} \cdot \nabla) \vec{U} = \frac{\nabla P}{\rho} + \nu \Delta \vec{U},$$

уравнение переноса энергии

$$\rho c_p \vec{U} \cdot \nabla T = \nabla \cdot \lambda \nabla^2 S_i, \quad (1)$$

уравнение переноса примеси

$$\vec{U} \cdot \nabla S_i = D_i \cdot \nabla^2 S_i,$$

где  $\vec{U}$  – поле скоростей расплава;  $P$  – давление в расплаве;  $\rho$  – плотность расплава;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости;  $c_p$  – теплоемкость при постоянном давлении;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $S_i$  – концентрация  $i$ -го компонента в расплаве;  $T$  – температура на стенках парогазового канала, К;  $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ ;  $\nabla = \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y}$ ;  $S_i$  – концентрация  $i$ -го компонента в расплаве;  $D_i$  – коэффициент диффузии  $i$ -го элемента расплава.

В соответствии с работой [8] коэффициент диффузии принимался зависящим от температуры:

$$D_i = D0_i \cdot \exp\left(\frac{Q_i}{8,13 \cdot T}\right),$$

где  $D0_i$  – амплитудное значение диффузии  $i$ -го элемента расплава;  $Q_i$  – энергия активации  $i$ -го компонента сплава; численные значения для конкретной марки стали представлены в табл. 1.

Таблица 1

Составляющие характеристики коэффициента диффузии для легирующих компонентов стали 12X18H10T [8]

Составляющие характеристики коэффициента диффузии	Основные легирующие элементы стали 12X18H10T	
	Cr	Mn
$D0_i, \text{ м}^2/\text{с}$	$1,318 \cdot 10^{-7}$	$2,515 \cdot 10^{-7}$
$Q_i, \text{ кДж/кг}$	3,92	3,99

Плотность потока массы  $i$ -го легирующего элемента на стенке парогазового канала определяется суммой плотностей потоков, обусловленных испарением ( $Jev_i$ ) и конденсацией ( $Jc_i$ ):

$$J_i = Jev_i + Jc_i.$$

Плотность потока, обусловленного испарением  $Jev_i$ , прямо пропорциональна концентрации примеси:

$$Jev_i = J0_i \cdot \frac{S_i}{S0_i},$$

где  $J0_i$  – плотность потока испарения над чистым  $i$ -м элементом;  $S0_i$ ,  $S_i$  – соответственно начальная и текущая концентрации  $i$ -го элемента в сплаве, последнее определяется из решения уравнения (1).

В свою очередь, плотность диффузионного потока испарения  $i$ -го элемента определяется в соответствии с работой [9] по формуле

$$J0_i = \mu_i \cdot Jv_i = \mu_i \cdot A \cdot \frac{P_i(T)}{\sqrt{\mu_i \cdot T}},$$

где  $\mu_i$  – масса в молях  $i$ -го элемента сплава;  $Jv_i$  – мольный поток  $i$ -го элемента сплава;  $A$  – размерный коэффициент;  $P_i(T)$  – давление  $i$ -го элемента расплава, определяется по методике, описанной в работе [10].

Плотность потока, конденсирующегося из парогазовой фазы на стенке канала проплавления,  $Jc_i$  пропорциональна средней концентрации элементов в парах:

$$Jc_i = k \frac{\langle S_i \rangle}{S_{0i}},$$

где  $k$  – коэффициент конденсации,  $0 < k < 1$  (для насыщенного пара  $k = 1$ );  $\langle S_i \rangle$  – среднее значение концентрации на поверхности парогазового канала  $i$ -го элемента.

Коэффициент  $k$  определяется из условия равенства суммарного потока массы на стенках парогазового канала  $\sum J_i$  потоку массы, уносимой через его выходное сечение:

$$\sum_{i=1}^N (Jev_i - Jc_i) \cdot S_{\text{канала}} = \frac{\partial m}{\partial t},$$

где  $S_{\text{канала}}$  – это площадь поперечного сечения парогазового канала;  $\frac{\partial m}{\partial t}$  – поток массы паров металла, уносимых через выходное сечение парогазового канала. Этот поток массы определяется из условия достижения на выходе из парогазового канала местной скорости звука [11]:

$$\frac{dm}{dt} = \sqrt{\gamma P_k \rho_k} \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{1+\gamma}{2(\gamma-1)}} \cdot S_{\text{канала}},$$

где  $\gamma$  – показатель адиабаты;  $P_k$  и  $\rho_k$  – давление и плотность паров в критическом сечении на выходе из парогазового канала соответственно.

Система дифференциальных уравнений имела следующие граничные условия: на входной границе задачи – постоянное значение концентрации и температуры  $S_i(x=0, L; y) = S_{0i}$  и  $T(x=0, L; y) = T_0$ . На выходной границе – условие продолжимости (постоянство плотности теплового потока):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x=L, y) = 0.$$

Боковая граница 2 является адиабатной:

$$\frac{\partial T(x=0, H)}{\partial x} = 0.$$

По нормали к оси симметрии ( $y=0$ ) задавались нулевые потоки массы и энергии:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \text{ и } \frac{\partial S_i}{\partial x} = 0.$$

На поверхности парогазового канала, которой соответствует граница 5, задавалась постоянная температура

$$T = T_n,$$

где  $T_n$  – температура на поверхности парогазового канала, и плотность потока массы

$$D_i \frac{\partial S_i}{\partial x} = J_i.$$

### Результаты численного исследования

Численное исследование процесса испарения химических элементов со стенок канала, конденсации элементов сплава на стенки парогазового канала и диффузии элементов в расплаве проводилось для

расчетной области при  $H = 1,5 \cdot 10^{-3}$  м;  $L = 3 \cdot 10^{-3}$  м;  $r = 2,5 \cdot 10^{-4}$  м;  $l = 1,6 \cdot 10^{-3}$  м. Исходные данные представлены в табл. 2.

Основной экспериментальной методики являлось определение температуры в канале проплавления при ЭЛС по данным о химическом составе паров, образующихся над зоной сварки. Для экспериментальной оценки состава паров на электронно-лучевой установке с энергетическим агрегатом ЭЛА-6ВЧ фирмы SELMI (Украина) производились проходы осциллирующим электронным пучком по образцу из аустенитной стали 12X18H10T. Вблизи зоны воздействия электронного пучка на образец (на расстоянии 15 мм) была установлена пластина из стекла. Далее проводился рентгенофлуоресцентный анализ полученного покрытия, данные представлены в табл. 3.

Таблица 2

Данные, используемые для расчета при ЭЛС стали 12X18H10T

№ п/п	Характеристики	Значение
1	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	7810
2	Теплопроводность, Вт/(м·К)	30,6
3	Теплоемкость при постоянном давлении, кДж/(кг·К)	0,830
4	Динамическая вязкость, Па·с	$1 \cdot 10^{-3}$
5	Рассчитанный коэффициент конденсации	0,97
6	Начальная температура на стенках канала проплавления $T_{п}$ , К	1800

Таблица 3

Первоначальные и экспериментальные значения концентраций элементов в стали 12X18H10T

Элементы	Концентрация (доли)	
	в основном металле	полученного покрытия
Железо	0,676	0,336
Марганец	0,02	0,350
Хром	0,19	0,240

Для решения задачи тепло- и массопереноса, включающей уравнения переноса импульса, энергии, массы, использовался пакет Comsol Multiphysics. Одним из входных параметров модели являлась температура стенок парогазового канала. Для каждого значения температуры путем решения испарения, конденсации, диффузии, тепло- и массопереноса определялась концентрация легирующих элементов в расплаве,

давление и концентрация химических элементов в парах. Применение параметрического решателя Comsol Multiphysics для кластера, когда решение для каждого значения параметра температуры проводится на отдельном узле, позволило значительно сократить время расчетов. Для определения температуры парогазовой фазы в парогазовом канале результаты расчетов сопоставлялись с данными, полученными при экспериментальных исследованиях (рис. 2).

На рис. 2 представлены результаты расчетов химического состава парогазовой фазы в зоне ЭЛС (представлены результаты только для железа, хрома и марганца, так как содержанием остальных элементов можно пренебречь) и концентрации химических элементов, полученные экспериментально при рентгенофлуоресцентном анализе (горизонтальные линии).

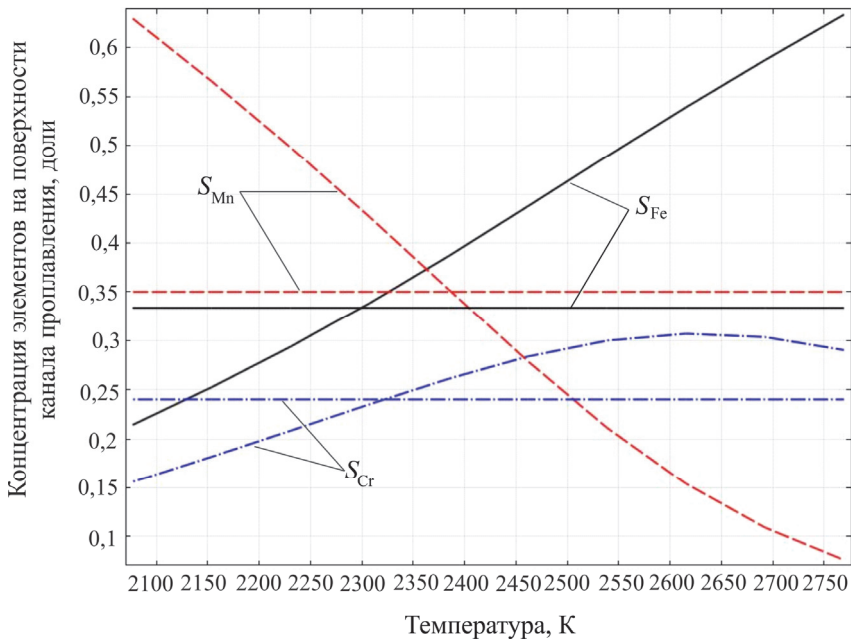


Рис. 2. Зависимость концентрации железа, марганца и хрома на поверхности канала от температуры для стали 12X18H10T: горизонтальными линиями обозначены экспериментальные значения концентраций; кривыми – расчетные

Значения температуры парогазовой фазы в канале определялись по пересечению расчетных и экспериментальных кривых концентрации элементов и составили 2320 К (для Fe), 2340 К (для Cr) и 2410 К (для Mn). Средняя арифметическая температура канала по этим эле-



ментам составляет 2360 К. Давление паров в канале при этой температуре – около 2 кПа (рис. 3).

На рис. 3 представлены кривые зависимости давления вышеуказанных элементов от температуры, полученные по разработанной математической модели, и зависимости, полученные в работах [9, 12] по равновесной модели, в соответствии с которой температура в канале составляет 2610 К. При этой температуре общее давление паров в канале составляет 11 кПа. Из графиков видно, что неравновесная модель дает меньшие значения температуры и давления паров в канале по сравнению с равновесной моделью.

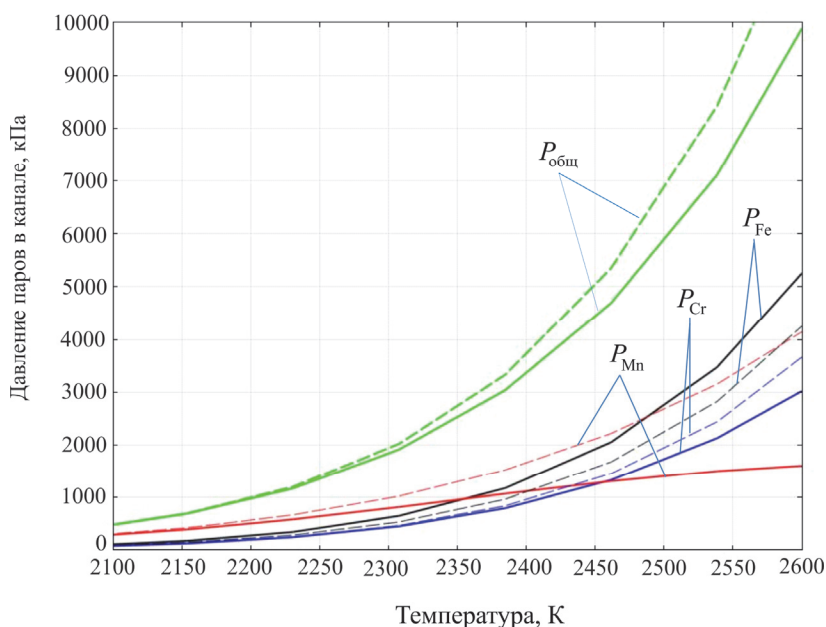


Рис. 3. Расчетные зависимости давления паров железа, марганца и хрома в канале от температуры: сплошные линии – с учетом диффузионных процессов; штриховые – без учета диффузионных процессов

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Диффузионные процессы в свариваемом материале при ЭЛС в значительной мере влияют на концентрацию химических элементов в поверхностном слое расплава парагазового канала и, как следствие, в парах над зоной сварки. Результаты численного моделирования с учетом обеднения стенок канала легирующими элементами приводят к меньшим, по сравнению с равновесной моделью, температурам

(~2360 К). Указанное различие температур обуславливает значительно меньшие расчетные величины давлений паров в парогазовом канале (2кПа – при учете диффузионных процессов и 11кПа – без учета диффузии).

2. Установлено, что состояние пара в канале близко к насыщенному. Поток массы, уносимой из выходного сечения парогазового канала, составляет около 3 % от общего потока, испаряемого со стенок парогазового канала.

3. Разработанная модель позволяет рассчитать давления, температуру и концентрации химических элементов в парогазовой смеси над зоной сварки при ЭЛС. Модель также позволяет прогнозировать изменение химического состава сварного шва при ЭЛС.

### Библиографический список

1. Ерофеев В.А., Логвинов Р.В., Нестеренков В.М. Особенности использования эквивалентного источника теплоты при учете деформаций и напряжений в процессе электронно-лучевой сварки // Сварка и диагностика. – 2010. – № 4. – С. 22–26.

2. Язовских В.М. Модель глубокого проплавления при электронно-лучевой сварке // Сварочное производство. – 2005. – № 8. – С. 16–20.

3. Numerical Modelling of the EBW process / V.A. Sudnik, V.A. Erofeev, K.-H. Richter, K.-V. Heins // Proceedings of International Conference Computer Technology in Welding and Manufacturing & Mathematical Modeling and Information Technologies in Welding and Related Processes, Kiev, 6–8 June. – Kiev, 2000. – P. 295–300.

4. Особенности структуры и свойств сварных соединений из толстолистовых сталей, выполненных электронно-лучевой сваркой / Т.П. Муравьева, В.К. Драгунов, А.П. Слива, А.Л. Гончаров // Сварочное производство. – 2010. – № 6. – С. 38–42.

5. Kaplan A.F.H., Norman P., Eriksson I. Analysis of the keyhole and weld pool dynamics by imaging evaluation and photodiode monitoring // Proceedings of LAMP2009 – the 5th International Congress on Laser Advanced Materials Processing. – 2009. – P. 1–6.

6. Numerical simulation of molten pool dynamics in high power disk laser welding / W.-I. Cho, S.-J. Na, C. Thomy, F. Vollertsen // Journal of Materials Processing Technology. – 2012. – № 212. – P. 262–275.

7. Development of a theory for alloying element losses during laser beam welding / U. Dilthey, A. Goumeniouk, V. Lopota, G. Turichin, E. Valdaitseva // *Journal of physics d: applied physics*. – 2001. – Vol. 34, № 1. – P. 81–86.

8. Ono Y., Matsumoto Sh. Diffusion of Chromium, Manganese, and Nickel in Molten Iron // *Materials Transactions*. – April 1974. – № 11. – P. 38–39.

9. Collur M.M., Paul A., Debroy T. Mechanism of Alloying element vaporization during laser welding // *Metallurgical Transactions*. – December 1987. – Vol. 18B. – P. 733–746.

10. Саломатова Е.С., Трушников Д.Н., Беленький В.Я. Моделирование температуры в парогазовом канале при электронно-лучевой сварке // *Тепловые процессы в технике*. – 2013. – № 11. – С. 514–519.

11. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: учеб. пособие: в 10 т. Т. VI. Гидродинамика. – 3-е изд., перераб. – М.: Наука, 1986. – 736 с.

12. Саломатова Е.С., Беленький В.Я. Термодинамическая оценка влияния теплофизических свойств легирующих элементов на давление паров в канале проплавления при электронно-лучевой сварке высоколегированных сталей // *Сварка и диагностика*. – 2011. – № 2. – С. 22–25.

### References

1. Erofeev V.A., Logvinov R.V., Nesterenkov V.M. Osobennosti ispolzovaniya ekvivalentnogo istochnika teploty pri uchete deformatsiy i napryazheniy v protsesse elektronno-luchevoy svarki [Features of the use of the equivalent heat source, taking into account the strain and stress in the process of electron beam welding]. *Welding and Diagnostics*, 2010, no. 4, pp. 22-26.

2. Yazovskikh V.M. Model glubokogo proplavleniya pri elektronno-luchevoy svarke [Model of deep penetration in electron beam welding]. *Welding Engineering*, 2005, no. 8, pp. 16-20.

3. Sudnik V.A., Erofeev V.A., Richter K.-H., Heins K.-V. Numerical Modelling of the EBW process. *Proceedings of International Conference Computer Technology in Welding and Manufacturing & Mathematical Modeling and Information Technologies in Welding and Related Processes*, Kiev, 2000, 6-8 June, pp. 295-300.

4. Muraveva T.P., Dpagunov V.K., Sliva A.P., Goncharov A.L. Osobennosti stpuktury i svoystv svarnykh soedineniy iz tolstolistovykh staley, vypolnennykh elektponno-luchevoy svapkoy [Features structs and properties of welded joints of steel plates made electron-beam welding]. *Welding Engineering*, 2010, no. 6, pp. 38-42.

5. Kaplan A.F.H., Norman P., Eriksson I. Analysis of the keyhole and weld pool dynamics by imaging evaluation and photodiode monitoring. Proceedings of LAMP2009. *The 5th International Congress on Laser Advanced Materials Processing*, 2009, pp. 1-6.

6. Cho W.-I., Na S.-J., Thomy C., Vollertsen F. Numerical simulation of molten pool dynamics in high power disk laser welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, no. 212, pp. 262-275.

7. Dilthey U., Goumeniouk A., Lopota V., Turichin G., Valdaitseva E. Development of a theory for alloying element losses during laser beam welding. *Journal of physics d. Applied physics*, 2001, vol. 34, no. 1, pp. 81-86.

8. Ono Y., Matsumoto Sh. Diffusion of Chromium, Manganese, and Nickel in Molten Iron. *Materials Transactions*, April 1974, no. 11, pp. 38-39.

9. Collur M.M., Paul A., Debroy T. Mechanism of Alloying element vaporization during laser welding. *Metallurgical Transactions*, December 1987, vol. 18B, pp. 733-746.

10. Salomatova E.S., Trushnikov D.N., Belenkiy V.Ya. Modelirovanie temperatury v parogazovom kanale pri elektronno-luchevoy svarke [Modeling of temperature of vapor-gas channel in electron beam welding]. *Thermal processes in engineering*, 2013, no. 11, pp. 514-519.

11. Landau L.D., Lifshits E.M. Teoreticheskaya fizika [Theoretical Physics]. Moscow: Nauka, 1986. 736 p.

12. Salomatova E.S., Belenkiy V.Ya. Termodinamicheskaya otsenka vliyaniya teplofizicheskikh svoystv legiruyushchikh elementov na davlenie parov v kanale proplavleniya pri elektronno-luchevoy svarke vysokolegirovannykh staley [Thermodynamic evaluation of the influence of thermal properties of alloying elements on the vapor pressure in the channel penetration in electron beam welding of high-alloy steels]. *Welding and Diagnostics*, 2011, no. 2, pp. 22-25.

### Об авторах

**Саломатова Екатерина Сергеевна** (Пермь, Россия) – ассистент кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: weld-katy@mail.ru).

**Трушников Дмитрий Николаевич** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная физика» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: trdimitr@yandex.ru).

**Цаплин Алексей Иванович** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Общая физика» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: tai@pstu.ru).

**Беленький Владимир Яковлевич** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: mtf@pstu.ru).

### About the authors

**Ekaterina S. Salomatova** (Perm, Russian Federation) – Assistant Lecturer, Department of Welding Production and Technology of Constructional Materials, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: weld-katy@mail.ru).

**Dmitriy N. Trushnikov** (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Applied Physics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: trdimitr@yandex.ru)

**Aleksey I. Tsaplin** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of General Physics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: tai@pstu.ru).

**Vladimir Ya. Belenkiy** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Welding Production and Technology of Constructional Materials, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: mtf@pstu.ru).

Получено 1.10.2014