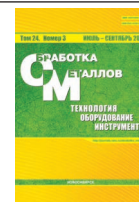




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Численный анализ процесса электронно-лучевой аддитивной наплавки с вертикальной подачей проволоочного материала

Глеб Пермяков^{1, a, *}, Роман Давлятин^{1, b}, Владимир Бельский^{1, c},
Дмитрий Трушников^{1, d}, Степан Варушкин^{1, e}, Шеньон Панг^{2, f}

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия

² Хуачжунский университет науки и технологии, район Хуншань, Луойю, 1037, г. Ухань, 430074, Китайская Народная республика

^a <https://orcid.org/0000-0001-8158-3460>, gleb.permyakov@yandex.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0002-7388-7699>, romadavly@gmail.com,

^c <https://orcid.org/0000-0001-7869-6632>, vladimirbelenkij@yandex.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0001-7105-7934>, trdimitr@yandex.ru,

^e <https://orcid.org/0000-0002-9346-6445>, stepan.varushkin@mail.ru, ^f <https://orcid.org/0000-0002-5171-4148>, spang@mail.hust.edu.cn

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.793.71

История статьи:

Поступила: 19 апреля 2022

Рецензирование: 28 апреля 2022

Принята к печати: 18 июня 2022

Доступно онлайн: 15 сентября 2022

Ключевые слова:

Электронный пучок
Электронно-лучевая наплавка
Аддитивные технологии
Численный эксперимент

Финансирование:

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Пермского края (соглашение С-26/508 от 09.03.2021 г.) и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание № FSNM-2021-0011 и № FSNM-2020-0028).

Благодарности:

Исследования частично выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» (соглашение с Минобрнаукой № 13.ЦКП.21.0034).

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время во всем мире активно развиваются аддитивные технологии, которые находят все более широкое применение в промышленном производстве. Применение электронного пучка в аддитивных процессах направленного ввода энергии, так называемых Directed Energy Deposition (DED) технологиях, имеет ряд преимуществ, основными среди которых являются гибкость управления пространственно-энергетическими характеристиками теплового источника и наличие вакуумной защитной среды. Стандартной схемой осуществления аддитивной электронно-лучевой наплавки является оплавление электронным пучком проволоочного присадочного материала, подаваемого сбоку в зону воздействия электронного пучка, однако такая схема аддитивной электронно-лучевой наплавки не обеспечивает равномерность теплового воздействия в наплавляемой области. Наиболее эффективным вариантом при электронно-лучевой наплавке является вертикальная подача проволоки, обеспечивающая наиболее стабильное формирование ванны жидкого металла и соответственно наплавленных валиков. При этом до настоящего времени отсутствуют результаты численного анализа этого процесса с целью определения основных его закономерностей. **Цель работы:** проведение численных экспериментов для качественного анализа и определения закономерностей формирования наплавляемых валиков и переноса присадочного материала, зависимости геометрических характеристик получаемых валиков от влияния сил давления паров, направления и величины азимутального угла действия источников тепла. **Методами исследования** являлась серия численных экспериментов, при которых анализировались варианты процесса электронно-лучевой наплавки при расположении вектора скорости наплавки в плоскости действия электронных пучков, и перпендикулярно этой плоскости для определения основных закономерностей формирования наплавляемых валиков и переноса присадочного материала, зависимости геометрических характеристик получаемых валиков от влияния сил давления паров, направления действия источников тепла и азимутального угла действия источников тепла. **Результаты и обсуждение.** Установлено, что геометрические характеристики наплавляемых валиков существенно зависят от взаимного расположения вектора скорости наплавки относительно плоскости действия электронных пучков, а учет силы давления паров оказывает значительное влияние на результаты численного моделирования формирования ванны расплава и протекающих в ней гидродинамических процессов. При этом при расположении вектора скорости наплавки перпендикулярно плоскости действия электронных пучков наблюдается более равномерная геометрия наплавляемых валиков металла, а увеличение азимутального угла действия источников тепла повышает вероятность выплесков на периферию наплавляемого валика, что связано с ограничением движения расплава в продольном направлении силами давления паров.

Для цитирования: Численный анализ процесса электронно-лучевой аддитивной наплавки с вертикальной подачей проволоочного материала / Г.Л. Пермяков, Р.П. Давлятин, В.Я. Бельский, Д.Н. Трушников, С.В. Варушкин, П. Шеньон // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 3. – С. 6–21. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.3-6-21.

*Адрес для переписки

Пермяков Глеб Львович, к.т.н., научный сотрудник,
Пермский национальный исследовательский
политехнический университет,
Комсомольский пр., 29,
614990, г. Пермь, Россия
Тел.: +7 (964) 18504-75, e-mail: gleb.permyakov@yandex.ru

Введение

В настоящее время во всем мире активно развиваются аддитивные технологии, которые находят все более широкое применение в промышленном производстве. Общий рост рынка аддитивных технологий ежегодно составляет более 20 %. Аддитивное производство основывается на новой эффективной концепции цифрового производства, при которой имеет место тесная связь всех этапов конструирования и производства изделия, обеспеченная наличием цифрового прототипа изделия и применением принципов сквозного проектирования.

В качестве материалов для печати металлом используют порошки или проволоочный материал. Использование порошков позволяет получить конечное изделие со сложной геометрией и высоким качеством поверхности, однако внедрение этих технологий сдерживается высокой стоимостью порошковых материалов и низкой производительностью. Использование в качестве исходного материала проволоки позволяет достичь высокой производительности процесса и существенной экономии по сравнению с порошковыми технологиями в связи с использованием более дешевого проволоочного материала.

Применение электронного пучка в аддитивных процессах направленного ввода энергии, так называемых *Directed Energy Deposition* (DED) технологиях, имеет ряд преимуществ, основными среди которых являются гибкость управления пространственно-энергетическими характеристиками теплового источника и наличие вакуумной защитной среды [1–5]. Такие технологии начали активно применяться в промышленности с начала 2000-х годов для изготовления деталей реактивных двигателей, лопаток турбин и других изделий из конструкционных сталей и сплавов цветных металлов [5–10]. Сочетание этих технологий с последующей механической обработкой позволяет добиться высокой эффективности изготовления деталей по сравнению с традиционными технологиями.

Стадии производства изделия предшествует предварительное моделирование с целью определения параметров технологии изготовления изделия для обеспечения требуемых эксплуатационных характеристик. При этом достоверность результатов моделирования в значитель-

ной мере зависит от качества и адекватности используемой модели процесса. Возможность моделирования технологического процесса представляет значительный интерес и является резервом для оптимизации технологических режимов изготовления деталей, разработки управляющих программ, минимизации дефектов и повышения качества изготовления сложных деталей.

Одним из важных факторов процессов электронно-лучевых аддитивных технологий, использующих наплавку проволоочного материала, является ориентация подачи проволоки.

Стандартной схемой осуществления аддитивной электронно-лучевой наплавки является оплавление электронным пучком проволоочного присадочного материала, подаваемого сбоку в зону воздействия электронного пучка. Такая схема аддитивной электронно-лучевой наплавки не обеспечивает равномерность теплового воздействия в наплавляемой области, так как электронный пучок не взаимодействует с частью наплавляемой поверхности в результате его экранировки присадочной проволокой. Разработан ряд моделей этого процесса, посвященных анализу процессов тепломассообмена при аддитивном формообразовании [11–14].

Наиболее эффективным вариантом при электронно-лучевой наплавке является вертикальная подача проволоки, обеспечивающая наиболее стабильное формирование ванны жидкого металла и соответственно наплавленных валиков. При этом для оплавления вертикально подаваемой проволоки целесообразно использовать две электронные пушки, симметрично оплавливающие присадочную проволоку. В работе [15] разработана математическая модель процесса оплавления вертикально оплавляемого проволоочного материала двумя симметрично расположенными электронными пучками без учета сил давления паров, а также дополнительных параметров процесса, таких как расположение и угол действия источников тепла, который оказывает значительное влияние на результаты численного моделирования формирования ванны расплава и протекающих в ней гидродинамических процессов.

В соответствии с этим целью данной работы служит проведение численных экспериментов для качественного анализа и определения ос-

новых закономерностей формирования наплавляемых валиков, характера переноса присадочного материала и зависимостей геометрических характеристик получаемых валиков от влияния сил давления паров, относительного расположения вектора скорости наплавки и плоскости действия электронных пучков и величины азимутального угла действия источников тепла.

Методика исследований

При аддитивной электронно-лучевой наплавке двумя симметрично действующими электронными пучками в процессе движения подложки возможны различные варианты расположения плоскости, в которой действуют электронные пучки, относительно вектора скорости наплавки и величины азимутального угла действия источников тепла.

В данной работе при численном моделировании использовалась ранее разработанная авторами математическая модель [15], в которой рассматривается взаимодействие твердого и жидкого металла. Для этого выделяются две фазы: Ω^l – жидкая и Ω^s – твердая, объединение которых представляет собой всю исследуемую область Ω . Твердая фаза, в свою очередь, состоит из проволоки Ω^{wire} и подложки Ω^{sub} . Движение металлического расплава можно описать как движение вязкой несжимаемой жидкости. В общем случае система уравнений будет состоять из дифференциальных уравнений, описывающих эволюцию плотности ρ , скоростей \mathbf{u} и температуры T в форме балансовых законов (уравнения баланса массы, импульса и энергии соответственно):

$$\begin{cases} \frac{d\rho}{dt} = -\rho \nabla \cdot \mathbf{u}, & \mathbf{R} \in \Omega^{wire}, \\ \frac{d\mathbf{u}}{dt} = \frac{1}{\rho} (-\nabla p + \mathbf{f}_v + \mathbf{f}_s + \mathbf{f}_v) + \mathbf{g}, & \mathbf{R} \in \Omega^l, \\ \frac{d\rho}{dt} = 0, \quad \frac{d\mathbf{u}}{dt} = 0, & \mathbf{R} \in \Omega^s, \\ \rho c_p \frac{dT}{dt} = -\nabla \cdot \mathbf{q} - s_v - s_{rad}, & \mathbf{R} \in \Omega, \end{cases} \quad (1)$$

где \mathbf{u} – скорость; ρ – плотность; \mathbf{f}_v – вязкие силы; \mathbf{f}_s – сила поверхностного натяжения; \mathbf{f}_v – сила давления паров; \mathbf{g} – ускорение свободного паде-

ния; c_p – удельная теплоемкость; \mathbf{q} – тепловой поток; k – коэффициент теплопроводности; s_v – потери тепла на испарение; s_{rad} – потери тепла на излучение.

Плотность ρ и давление P связаны с помощью уравнения состояния:

$$P(\rho) = \frac{c_0^2 \rho_0}{7} \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^7 - 1 \right], \quad (2)$$

где c_0 и ρ_0 – скорость звука и плотность при нулевом приложенном напряжении.

Для несжимаемых жидкостей вязкие силы примут следующий вид:

$$\mathbf{f}_v = \eta \nabla^2 \mathbf{u}, \quad (3)$$

где η – динамическая вязкость.

Следуя континуальному подходу Брэкбилла и Коте [16], основанному на континуальной поверхностной силе (Continuous Surface Force, CSF), эффекты поверхностного натяжения рассматриваются как объемные силы в уравнении (1), распределенные по межфазному объему конечной ширины. Сила поверхностного натяжения складывается из нормальной и тангенциальной составляющей:

$$\mathbf{f}_s = -\alpha \kappa \mathbf{n} + (\mathbf{I} - \mathbf{n}\mathbf{n}) \nabla \alpha, \quad (4)$$

где α – коэффициент поверхностного натяжения; $\kappa = \nabla \cdot \mathbf{n}$ – кривизна поверхности; \mathbf{n} – нормаль к поверхности; \mathbf{I} – единичный тензор, $\nabla \alpha = d\alpha(T)/dT$. Зависимость коэффициента поверхностного натяжения от температуры выбрана линейной:

$$\alpha(T) = \alpha_0 - \alpha'_0 (T - T_0), \quad (5)$$

где α_0 – коэффициент поверхностного натяжения при температуре T_0 . Эта зависимость и отражает эффект Марангони.

Помимо стандартных капиллярных эффектов высокие температуры, характерные для процессов аддитивного производства, приводят к испарению металла, что ведет к образованию силы давления паров и потере тепла на испарение. Обычно для моделирования этих процессов используется феноменологическая модель [17, 18]:

$$\mathbf{f}_v = -p_v(T)\mathbf{n}, \quad p_v(T) = C_p \exp \left[-C_T \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_v} \right) \right], \quad (6)$$

где T_v – температура кипения, постоянные $C_p = 0,54 p_a$ и $C_T = h_v/R$ содержат атмосферное давление p_a , молярную скрытую теплоту плавления h_v и молярную газовую постоянную R .

Следуя той же феноменологической модели, что и для давления паров, потери тепла за счет испарения имеют вид

$$s_v = -m_v [h_v + h(T)],$$

$$m_v = 0,82 c_s p_v(T) \sqrt{\frac{C_M}{T}}, \quad (7)$$

$$h(T) = \int_{T_{h,0}}^T c_p dT.$$

где скорость энтальпии на единицу площади поверхности s_v получается из произведения потока массы пара на единицу площади поверхности m_v и суммы удельной энтальпии $h(T)$ и скрытой теплоты испарения h_v на единицу массы. $T_{h,0}$ – начальная температура удельной энтальпии, а константа $C_M = M/(2\pi R)$ содержит молярную массу M и молярную газовую постоянную R ; c_s – так называемая константа прилипания, которая принимает значение, близкое к единице для металлов [19, 20].

Сила давления плазменной дуги учитывается следующим образом [21]:

$$\mathbf{f}_{pl} = -p_{pl}(x, y)\mathbf{n},$$

$$p_{pl}(x, y) = 2k_I I_a^2 \exp \times \left(-\frac{2}{R^2} \left((x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \right) \right). \quad (8)$$

Излучение моделируется уравнением Стефана–Больцмана:

$$s_{rad} = \sigma_B \varepsilon (T - T_0)^4, \quad (9)$$

где σ_B – постоянная Больцмана; ε – излучательная способность материала; T_0 – температура окружающей среды.

Для решения данной математической модели использовался метод гидродинамики сглаженных частиц (*Smoothed Particle Hydrodynamics*, SPH) и была проведена серия численных экспериментов по определению основных закономерностей формирования наплавляемых валиков и переноса присадочного материала, зависимости геометрических характеристик получаемых валиков от влияния сил давления паров, направления действия источников тепла и азимутального угла действия источников тепла. При этом анализировались варианты процесса электронно-лучевой наплавки при расположении вектора скорости наплавки в плоскости действия электронных пучков (рис. 1, а) и перпендикулярно этой плоскости (рис. 1, б).

При расчетах использовались следующие геометрические характеристики моделируемой системы и предварительные параметры процесса (табл. 1).

В качестве наплавляемого материала и материала подложки при моделировании рассматривалась аустенитная хромоникелевая сталь 04X18H10 (теплофизические характеристики представлены в табл. 2).

Численная реализация осуществлялась на многопроцессорном компьютере IBM 2×300 sas 15k (4xIntel Xeon E7520, 64 Гб) с использованием возможностей многопоточковых вычислений MPI в пакете LAMMPS.

Исследование влияния взаимного расположения вектора скорости наплавки относительно плоскости действия электронных пучков. На рис. 2 и 3 представлены результаты численного анализа процесса наплавки вертикально подаваемого проволочного материала, оплаиваемого двумя симметрично действующими электронными пучками, без учета (рис. 2, а) и с учетом (рис. 2, б) сил давления паров металла. На рис. 2 представлен вариант, при котором вектор скорости наплавки лежит в плоскости действия электронных пучков, а на рис. 3 – вариант, при котором вектор скорости наплавки перпендикулярен плоскости действия электронных пучков.

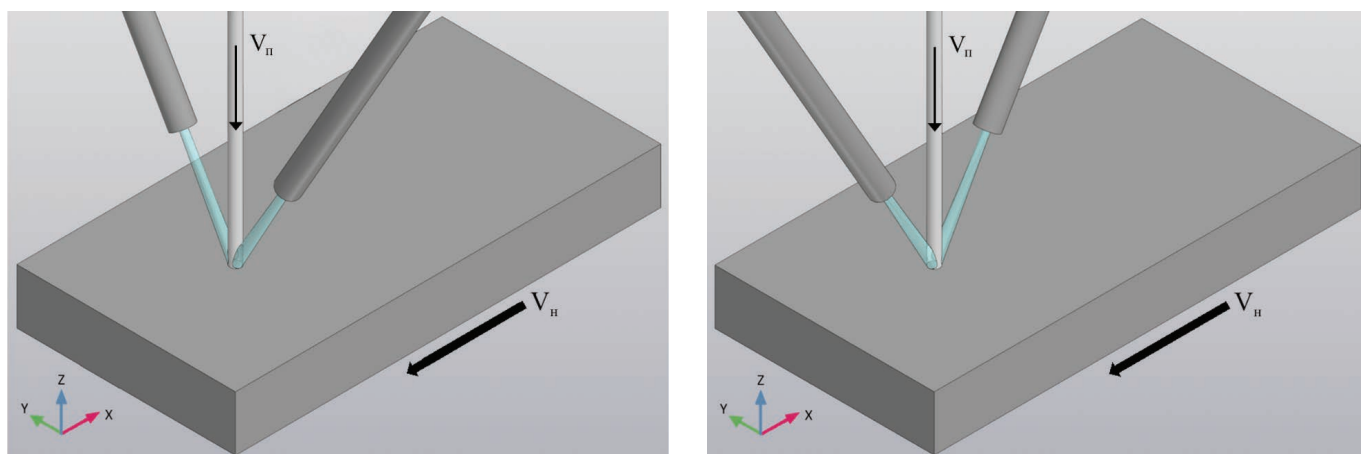

a
б

Рис. 1. Варианты относительного расположения вектора скорости наплавки и плоскости действия электронных пучков:

a – вектор скорости наплавки лежит в плоскости действия электронных пучков; *б* – вектор скорости наплавки перпендикулярен плоскости действия электронных пучков

Fig. 1. Variants of the relative position of the deposition velocity vector and the action plane of the electron beams:
a – the deposition velocity vector lies in the action plane of the electron beams; *b* – the deposition velocity vector is perpendicular to the action plane of the electron beams

Таблица 1

Table 1

Характеристики системы System characteristics

Характеристики Characteristics	Обозначение Designation	Размерность Dimension	Значение Value
Размер подложки Substrate size	$D \times \Pi \times B$ $L \times B \times H$	мм mm	20×10×3,5
Диаметр проволоки Wire diameter	d_n d_w	мм mm	1,2
Скорость подачи проволоки Wire feed speed	V_{nn} V_{wf}	мм/с mm/sec	30
Скорость движения подложки (скорость наплавки) Substrate motion speed (deposition speed)	V_n V_s	мм/с mm/sec	15
Диаметр источников тепла (электронных пучков) Diameter of heat sources (electron beams)	D	мм mm	1,5
Тепловая мощность каждого источника Thermal power of each source	Q	Вт W	350
Азимутальный угол действия источников тепла Azimuthal angle of the heat sources action	α	°	45/15

Полученные результаты свидетельствуют о том, что геометрические характеристики наплавляемых валиков существенно зависят от взаимного расположения вектора скорости наплавки

относительно плоскости действия электронных пучков.

Без учета сил давления паров в обоих случаях наблюдается формирование достаточно рав-

Использованные при расчете теплофизические характеристики стали 04X18H10

Thermal physical characteristics of 04Cr18Ni10 steel used in the calculation

Характеристика Characteristics	Обозначение Designation	Размерность Dimension	Значение Value
Температура плавления Melting temperature	$T_{пл}$ T_{melt}	К K	1800
Удельная теплоемкость Specific heat capacity	C_p	$\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	710
Плотность Density	ρ	$\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	7680
Теплопроводность Thermal conductivity	λ	$\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	26
Скрытая теплота плавления Enthalpy of fusion	$H_{пл}$ H_f	Дж/кг J/kg	276 000
Температура кипения Boiling Point	$T_{кип}$ T_{evp}	К K	3133
Энтальпия испарения Enthalpy of evaporation	$H_{кип}$ H_{evp}	Дж/кг J/kg	351 000
Динамическая вязкость Dynamic viscosity	μ	$\text{Па} \cdot \text{с}$ $\text{Pa} \cdot \text{s}$	0,007
Коэффициент поверхностного натяжения Surface tension coefficient	σ	$\text{Н} \cdot \text{м}^{-1}$ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	1,615
Температурный коэффициент поверхностного натяжения Temperature coefficient of surface tension	$\gamma = \frac{d\sigma}{dT}$	$\text{Н} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	-0,00043

номерных валиков без значительных искажений линии сплавления и струйный перенос присадочного материала в ванну расплава.

Учет силы давления паров оказывает значительное влияние на результаты численного моделирования формирования ванны расплава и протекающих в ней гидродинамических процессов, так как известно, что силы давления паров являются основной движущей силой в сварочной ванне [22]. Изменяется также характер переноса присадочного материала.

При учете действия сил давления паров численные расчеты показывают значительно большую глубину проплавления основного металла, ширина наплавленных валиков при этом увеличивается приблизительно на 20 %. Под действием сил давления паров в расплаве формируется кратер, и металл вытесняется на периферию

ванны жидкого металла. Кратер имеет вытянутую форму в направлении, совпадающем с проекцией плоскости действия электронных пучков. Изменения в соотношении сил, действующих на ванну и формируемые капли присадочного материала, приводят к переходу на крупнокапельный перенос металла.

С учетом сил давления паров при расположении вектора скорости наплавки в плоскости действия электронных пучков имеет место асимметрия геометрии наплавленных валиков. Это связано с тем, что векторы силы давления паров от воздействия тепловых источников, находясь в плоскости расположения вектора наплавки, ограничивают движение расплава в продольном направлении и вытесняют его на периферию наплавленного валика, при этом направление выплесков имеет стохастический характер.

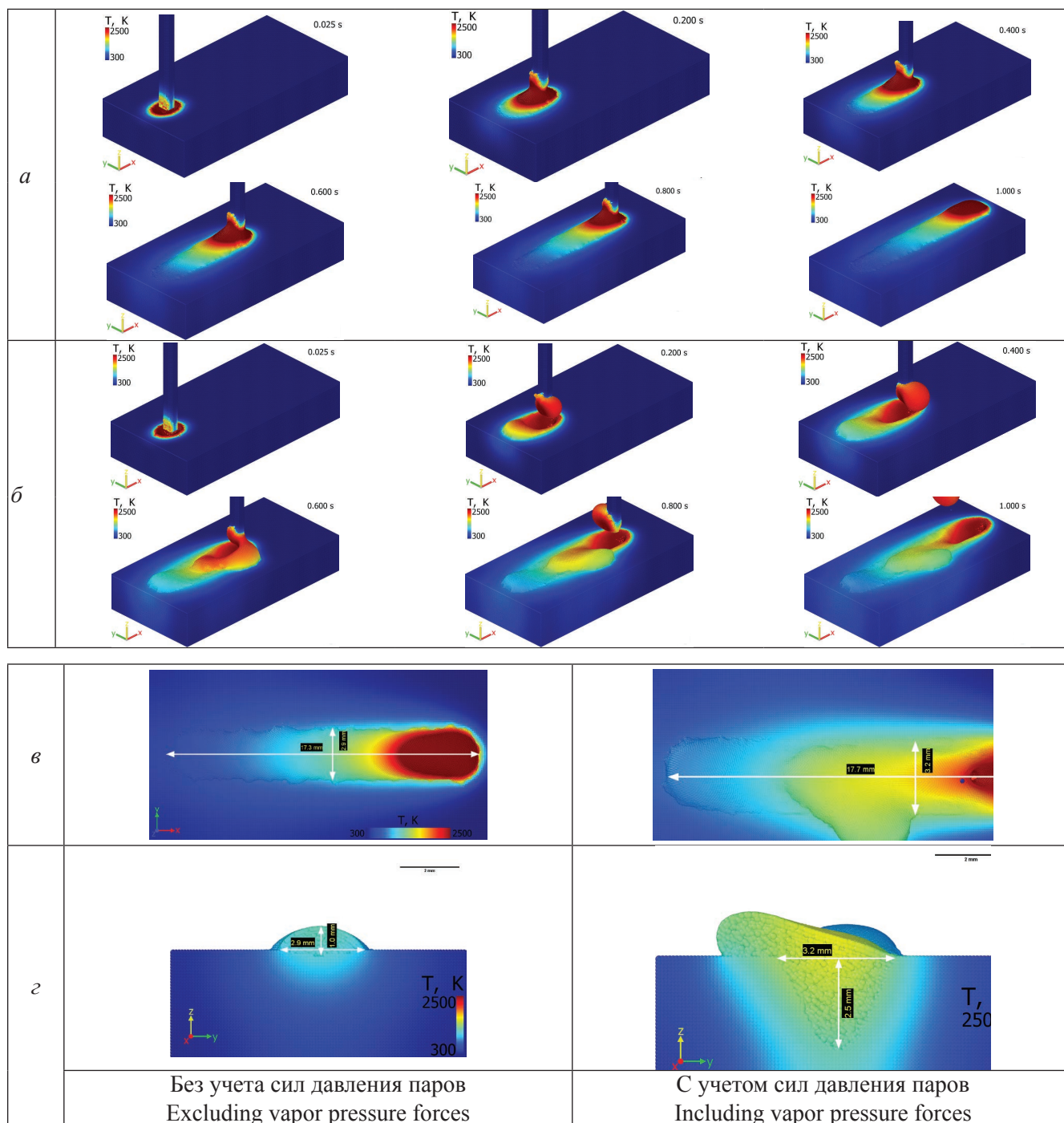


Рис. 2. Результаты численного расчета процесса наплавки вертикально подаваемого проволочного материала, оплаиваемого двумя симметрично действующими электронными пучками, для варианта, при котором вектор скорости наплавки лежит в плоскости действия электронных пучков:

a – фрагменты результатов численного анализа без учета действия сил давления паров металла; *б* – фрагменты результатов численного анализа с учетом сил давления паров металла; *в* – геометрические характеристики наплавленного валика; *г* – поперечные сечения зон проплавления и геометрия валиков (мощность каждого источника тепла 350 Вт, азимутальный угол действия каждого источника тепла 45° к вертикали)

Fig. 2. The results of numerical calculation of the deposition process of vertically fed wire material melted by two symmetrically acting electron beams, for the variant in which the deposition velocity vector lies in the action plane of the electron beams:

a – fragments of the results of numerical analysis excluding metal vapor pressure; *б* – fragments of numerical analysis results including metal vapor pressure forces; *в* – geometric characteristics of the deposited beads; *г* – cross sections of fusion zones and geometry of the beads (power of each heat source is 350 W, azimuthal angle of each heat source is 45 ° to the vertical)

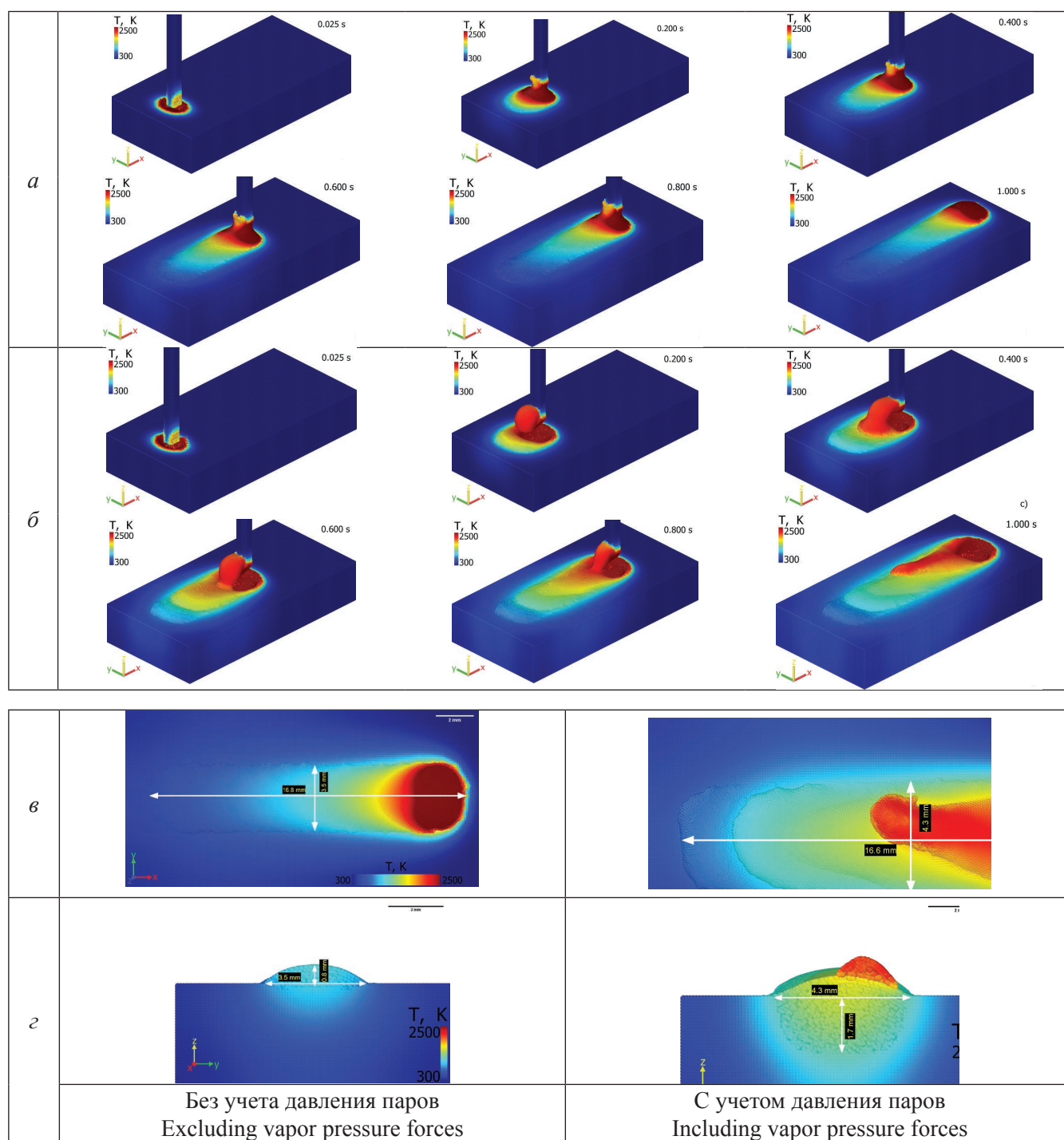


Рис. 3. Результаты численного расчета процесса наплавки вертикально подаваемого проволочного материала, оплаиваемого двумя симметрично действующими электронными пучками, для варианта, при котором вектор скорости наплавки перпендикулярен плоскости действия электронных пучков:

a – фрагменты результатов численного анализа без учета действия сил давления паров металла; *б* – фрагменты результатов численного анализа с учетом сил давления паров металла; *в* – геометрические характеристики наплавленного валика; *г* – поперечные сечения зон проплавления и геометрия валиков (мощность каждого источника тепла 350 Вт, азимутальный угол действия каждого источника тепла 45° к вертикали)

Fig. 3. Results of numerical calculation of the of the deposition process of a vertically fed wire material melted by two symmetrically acting electron beams, for the variant in which the deposition velocity vector is perpendicular to the plane of action of the electron beams:

a – fragments of the results of numerical analysis excluding metal vapor pressure; *б* – fragments of numerical analysis results including metal vapor pressure; *в* – geometric characteristics of the deposited beads; *г* – cross sections of fusion zones and geometry of the beads (power of each heat source is 350 W, azimuthal angle of each heat source is 45 ° to the vertical)

При расположении вектора скорости наплавки перпендикулярно плоскости действия электронных пучков наблюдается более равномерная геометрия валиков, поскольку распределение сил, действующих на ванну расплава, не препятствует движению расплава в хвостовую её часть. При этом не происходит локальных выплесков за пределы наплавляемого валика.

Исследование влияния азимутального угла наклона электронных пучков. На рис. 4 и 5 представлены результаты численного анализа процесса наплавки вертикально подаваемого проволочного материала, оплавляемого двумя симметрично действующими электронными пучками, при различных азимутальных углах наклона электронных пучков.

Результаты расчетов показывают, что с уменьшением азимутального угла уменьшается площадь проекции электронных пучков на плоскость подложки, при этом ширина зоны обработки также сокращается. При сохранении объема подаваемого присадочного материала это приводит к увеличению высоты наплавляемых валиков. Кроме того, повышается плотность энергии в пятне нагрева и увеличивается проплавливающая способность электронных пучков.

При расположении вектора скорости в плоскости действия электронных пучков с уменьшением азимутального угла действия каждого источника увеличивается глубина проплавления и увеличивается высота наплавляемого валика. Ширина наплавляемых валиков остается практически без изменений.

Уменьшение азимутального угла положительным образом сказывается на равномерности наплавляемых валиков, исключается возможность локальных выплесков на периферию, при этом весь поступающий металл участвует в формировании валика, и наблюдается мелкокапельный перенос присадочного материала.

С увеличением азимутального угла действия каждого источника повышается вероятность выплесков на периферию за счет того, что векторы силы давления паров от воздействия тепловых источников, находясь в плоскости расположения вектора наплавки, ограничивают движение расплава в продольном направлении, и тем сильнее вытесняют его на периферию наплавляемого валика, чем ближе азимутальный угол действия каждого источника к горизонтали.

При расположении вектора скорости перпендикулярно плоскости действия электронных пучков с уменьшением азимутального угла действия каждого источника сокращается ширина наплавляемых валиков и увеличивается глубина проплавления подложки и высота наплавляемых валиков.

Результаты и обсуждение

Численные эксперименты по определению зависимостей геометрических характеристик получаемых валиков от влияния сил давления паров, направления действия источников тепла и азимутального угла действия источников тепла показали, что учет силы давления паров оказывает значительное влияние на результаты численного моделирования формирования ванны расплава и протекающих в ней гидродинамических процессов, а также на характер капельного переноса металла.

Было установлено, что при расположении вектора скорости наплавки перпендикулярно плоскости действия электронных пучков наблюдается более равномерная геометрия валиков, поскольку распределение сил, действующих на ванну расплава, не препятствует движению расплава в хвостовую её часть. При этом увеличение азимутального угла действия источников тепла повышает вероятность выплесков на периферию наплавляемого валика, что связано с ограничением движения расплава в продольном направлении силами давления паров.

Заключение

Результаты численного анализа процесса аддитивной электронно-лучевой наплавки проволочного материала, оплавляемого двумя симметрично действующими электронными пучками, подтвердили необходимость учета влияния сил давления паров ввиду значительного влияния на гидродинамические процессы в сварочной ванне, характер переноса наплавляемого металла и, как следствие, на формирование наплавляемых валиков.

В результате численного эксперимента наилучшее формирование наплавленных валиков обеспечивается при меньшем азимутальном угле наклона каждого электронного пучка

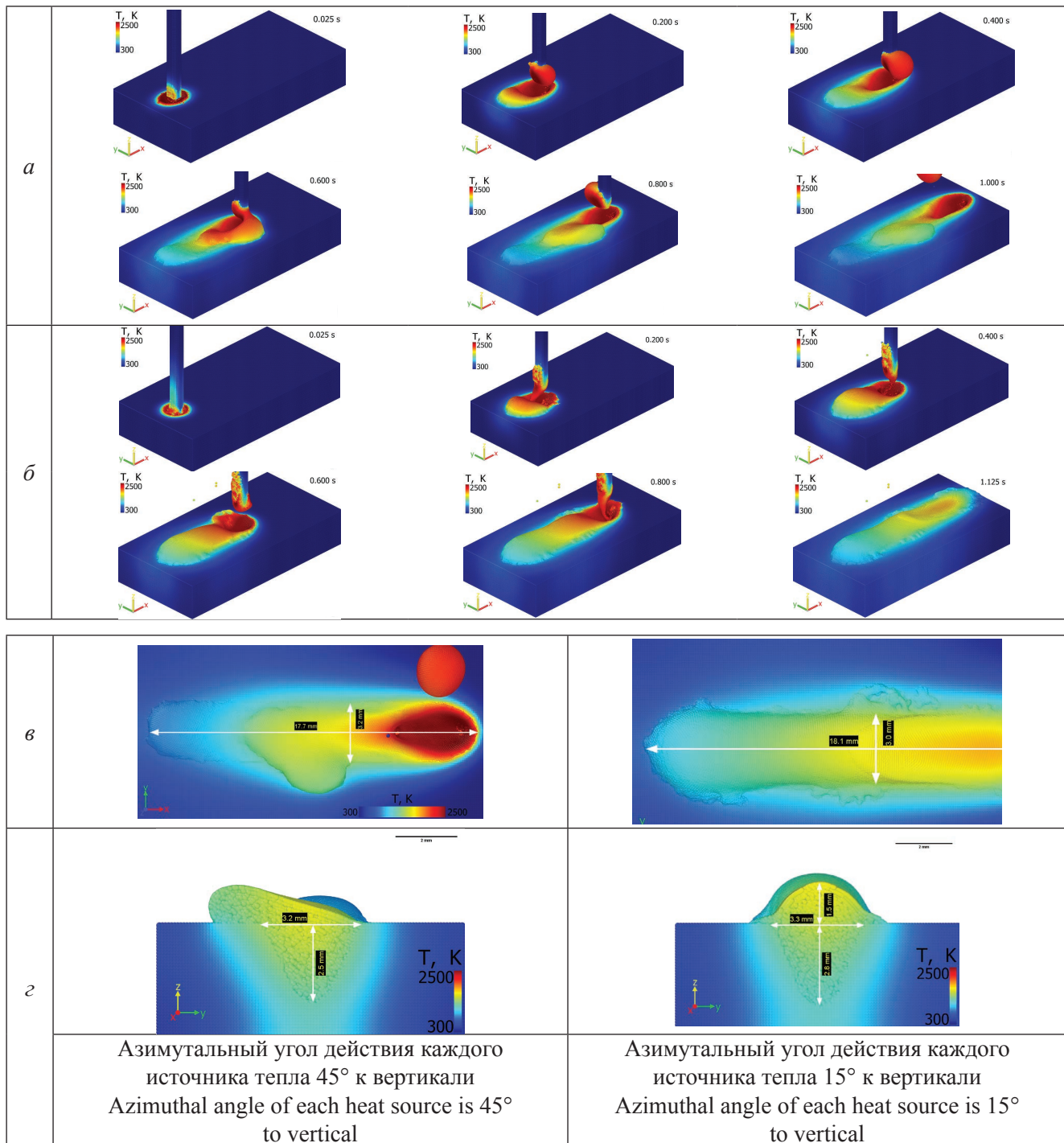


Рис. 4. Результаты численного расчета процесса наплавки вертикально подаваемого проволочного материала, оплаваемого двумя симметрично действующими электронными пучками, для варианта, при котором вектор скорости наплавки лежит в плоскости действия электронных пучков:

a – фрагменты результатов численного анализа при азимутальном угле наклона каждого электронного пучка 45° к вертикали; *б* – фрагменты результатов численного анализа при азимутальном угле наклона каждого электронного пучка 15° к вертикали; *в* – геометрические характеристики наплавленного валика; *г* – поперечные сечения зон проплавления и геометрия валиков (мощность каждого источника тепла 350 Вт)

Fig. 4. Results of numerical calculation of the deposition process of a vertically fed wire material, melted by two symmetrically acting electron beams, for the variant in which the deposition velocity vector lies in the action plane of the electron beams:

a – fragments of the results of numerical analysis at an azimuthal angle of inclination of each electron beam 45° to the vertical; *б* – fragments of the results of numerical analysis at an azimuthal angle of inclination of each electron beam 15° to the vertical; *в* – geometric characteristics of the deposited bead; *г* – cross-sections of the penetration zones and geometry of the beads (power of each heat source is 350 W)

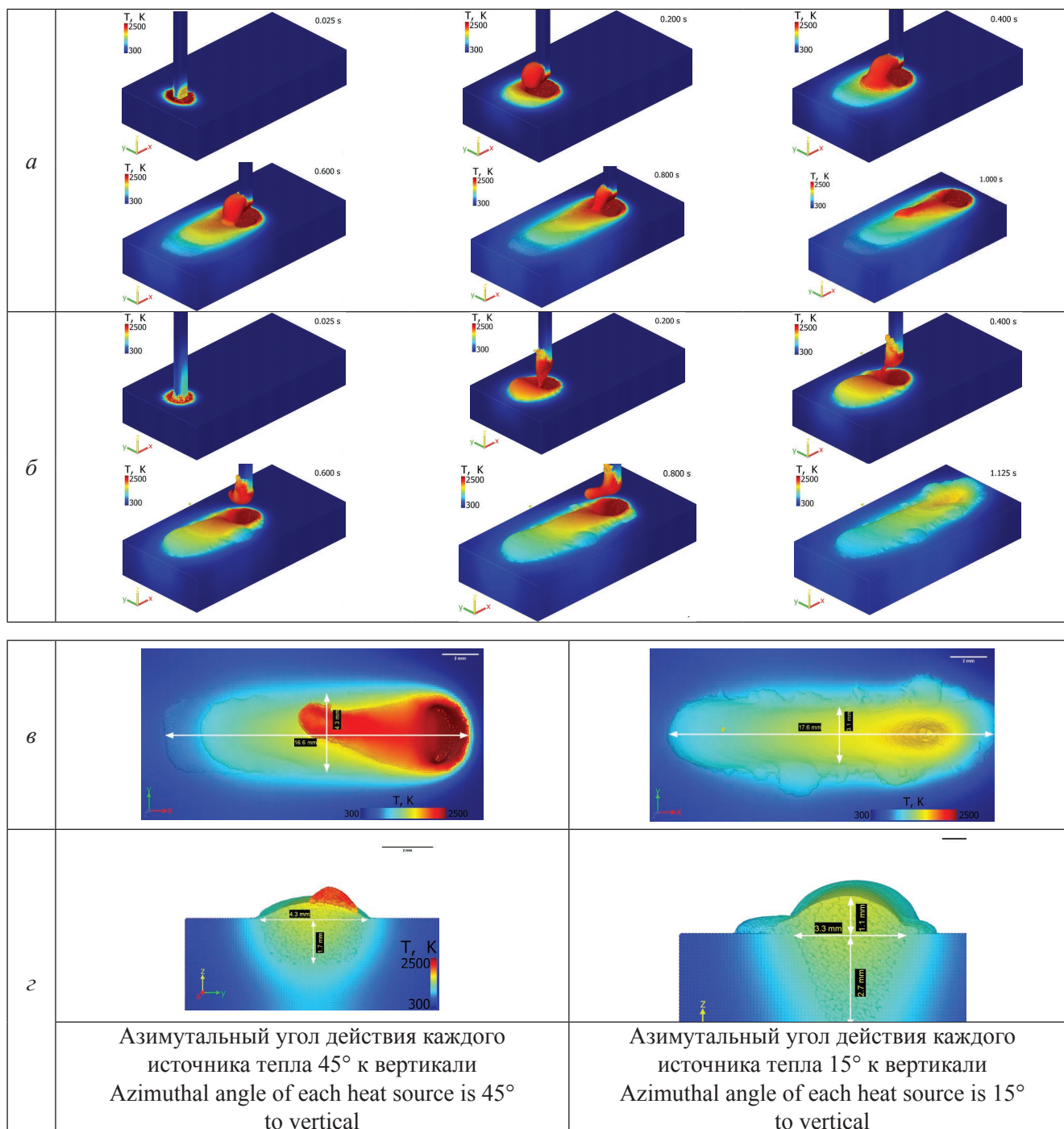


Рис. 5. Результаты численного расчета процесса наплавки вертикально подаваемого проволочного материала, оплавляемого двумя симметрично действующими электронными пучками, для варианта, при котором вектор скорости наплавки перпендикулярен плоскости действия электронных пучков:

а – фрагменты результатов численного анализа при азимутальном угле наклона каждого электронного пучка 45° к вертикали; б – фрагменты результатов численного анализа при азимутальном угле наклона каждого электронного пучка 15° к вертикали; в – геометрические характеристики наплавленного валика; г – поперечные сечения зон проплавления и геометрия валиков (мощность каждого источника тепла 350 Вт)

Fig. 5. Results of numerical calculation of the deposition process of a vertically fed wire material, melted by two symmetrically acting electron beams, for the variant in which the deposition velocity vector is perpendicular to the plane of action of the electron beams:

а – fragments of the results of numerical analysis at an azimuthal angle of inclination of each electron beam 45° to the vertical; б – fragments of the results of numerical analysis at an azimuthal angle of inclination of each electron beam 15° to the vertical; в – geometric characteristics of the deposited bead; г – cross-sections of the penetration zones and geometry of the beads (power of each heat source is 350 W)

к вертикали, при этом наблюдаются незначительные искажения формы наплавляемых валиков от расположения вектора скорости наплавки относительно плоскости действия электронных пучков, что также подтверждает перспективность разрабатываемой технологии для выращивания деталей сложной формы.

Следующим этапом исследований станет верификация и калибровка математической модели с использованием экспериментальных данных для обеспечения возможности прогнозирования результатов наплавки и дальнейшей оптимизации процесса.

Список литературы

1. *Taminger K.M., Hafley R.A.* Electron beam freeform fabrication (EBF³) for cost effective near-net shape manufacturing. – Hampton, VA: National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center, 2006. – (NASA technical memorandum; NASA/TM-2006-214284URL). – URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20060009152> (accessed: 23.06.2022).

2. Patent Application US 2016/0288244 A1. Electron beam layer manufacturing: № 5/180,665: filed 13.06.2016: publ. date 06.10.2016 / Scott Stecker. – 30 p.

3. In-process thermal imaging of the electron beam freeform fabrication process / K.M. Taminger, C.S. Domack, J.N. Zalameda, B.L. Taminger, R.A. Hafley, E.R. Burke // *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*. – 2016. – Vol. 9861. – P. 986102. – DOI: 10.1117/12.2222439.

4. *Fuchs J., Schneider C., Enzinger N.* Wire-based additive manufacturing using an electron beam as heat source // *Welding in the World*. – 2018. – Vol. 62. – P. 267–275. – DOI: 10.1007/s40194-017-0537-7.

5. Особенности формирования изделий методом электронно-лучевой наплавки / А.В. Гуденко, А.П. Слива, В.К. Драгунов, А.В. Щербаков // *Сварочное производство*. – 2018. – № 8. – С. 12–19.

6. Effect of surface treatments on electron beam freeform fabricated aluminum structures / K.M. Taminger, R.A. Hafley, D.T. Fahringer, R.E. Martin // *2004 International Solid Freeform Fabrication Symposium*. – Austin, TX, 2004. – P. 460–470. – DOI: 10.26153/tsw/7012.

7. AWS C7.1M/C7.1:2013. Recommended practices for electron beam welding and allied processes / American Welding Society (AWS), Committee on High Energy Beam Welding and Cutting. – American Welding Society, 2013. – 150 p. – ISBN 0-87171-721-2.

8. *Bird R.K., Atherton T.S.* Effect of orientation on tensile properties of Inconel 718 block fabricated with electron beam freeform fabrication (EBF³). – Hampton,

VA: National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center, 2010. – (NASA technical memorandum; NASA/TM-2010-216719). – URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20100025706> (accessed: 23.06.2022).

9. Microstructure and mechanical properties of electron beam deposits of AISI 316L stainless steel / L. Wang, S.D. Felicelli, J. Coleman, R. Johnson, K.M.B. Taminger, R.L. Lett // *Proceedings of the ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. – Denver, Colorado, USA, 2011. – Vol. 3: Design and Manufacturing. – P. 15–21. – DOI: 10.1115/IMECE2011-62445.

10. *Ivanchenko V.G., Ivasishin O.M., Semiatin S.L.* Evaluation of evaporation losses during electron-beam melting of Ti-Al-V alloys // *Metallurgical and Materials Transactions B*. – 2003. – Vol. 34 (6). – P. 911–915. – DOI: 10.1007/s11663-003-0097-7.

11. Research on modeling of heat source for electron beam welding fusion-solidification zone / Y. Wang, P. Fu, Y. Guan, Z. Lu, Y. Wei // *Chinese Journal of Aeronautics*. – 2013. – Vol. 26 (1). – P. 217–223. – DOI: 10.1016/j.cja.2012.12.023.

12. *Chowdhury S., Nirsanametla Y., Muralidhar M.* Studies on heat transfer analysis of Ti2AlNb electron beam welds using hybrid volumetric heat source // *Proceedings of the International Congress 2017 of the International Institute of Welding*, 07–09 December 2017. – Chennai, India, 2017.

13. Modelling of heat and mass transfer for wire-based additive manufacturing using electric arc and concentrated sources of energy / D. Trushnikov, A. Perminov, V. Belenkiy, G. Permyakov, M. Kartashov, E. Matveev, A. Dushina, Y. Schitsyn, S. Pang, K.P. Karunakaran // *International Journal of Engineering and Technology*. – 2018. – Vol. 7, N 4.38. – P. 741–747. – DOI: 10.14419/ijet.v7i4.38.25777.

14. *Mladenov G.M., Koleva E.G., Trushnikov D.N.* Mathematical modelling for energy beam additive manufacturing // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1089. – Art. 012001. – DOI: 10.1088/1742-6596/1089/1/012001.

15. Разработка и совершенствование технологий и оборудования для электронно-лучевого выращивания изделий / Д.Н. Трушников, Г.Л. Пермяков, С.В. Варушкин, Р.П. Давлятшин, Ю.В. Баяндин, Ш. Панг // *СТИН*. – 2021. – № 6. – С. 38–40.

16. *Brackbill J., Kothe D.* Dynamic modeling of the surface tension // *Proceedings of the Third Microgravity Fluid Physics Conference*. – Cleveland, OH: NASA Lewis Research Center, 1996. – P. 693–698.

17. *Anisimov S.I., Khokhlov V.A.* Instabilities in laser-matter interaction. – Boca Raton, FL: CRC Press, 1995. – 141 p. – ISBN 0-8493-8660-8.

18. Weld pool flows during initial stages of keyhole formation in laser welding / J.-H. Cho, D.F. Farson, J.O. Milewski, K.J. Hollis // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2009. – Vol. 42, N 17. – DOI: 10.1088/0022-3727/42/17/175502.

19. Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter and denudation zones / S.A. Khairallah, A.T. Anderson, A. Rubenchik, W.E. King // *Acta Materialia*. – 2016. – Vol. 108 (16). – P. 36–45. – DOI: 10.1016/j.actamat.2016.02.014.

20. Fundamental analysis of the influence of powder characteristics in Selective Laser Melting of molybdenum based on a multi-physical simulation model /

K.-H. Leitz, C. Grohs, P. Singer, B. Tabernig, A. Planckensteinner, H. Kestler, L.S. Sigl // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2018. – Vol. 72. – P. 1–8. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2017.11.034.

21. Страхова Е.А., Ерофеев В.А., Судник В.А. Физико-математическое моделирование процесса широкослойной наплавки с поперечными колебаниями плазмотрона // *Сварка и диагностика*. – 2009. – № 3. – С. 32–38.

22. Semak V., Matsunawa A. The role of recoil pressure in energy balance during laser materials processing // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 1997. – Vol. 30, N 18. – P. 2541–2552.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2022 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov







Numerical analysis of the process of electron beam additive deposition with vertical feed of wire material



Gleb Permyakov^{1, a, *}, Roman Davlyatshin^{1, b}, Vladimir Belenkiy^{1, c},
 Dmitry Trushnikov^{1, d}, Stepan Varushkin^{1, e}, Shengyong Pang^{2, f}

¹ Perm National Research Polytechnic University, 29 Komsomolsky Prospekt, Perm, 614990, Russian Federation

² Huazhong University of Science and Technology, Luoyu street No1037, Hongshan district, Wuhan city, 430074, China

^a  <https://orcid.org/0000-0001-8158-3460>,  gleb.permyakov@yandex.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0002-7388-7699>,  romadavly@gmail.com,

^c  <https://orcid.org/0000-0001-7869-6632>,  vladimirbelenkij@yandex.ru, ^d  <https://orcid.org/0000-0001-7105-7934>,  trdimitr@yandex.ru,

^e  <https://orcid.org/0000-0002-9346-6445>,  stepan.varushkin@mail.ru, ^f  <https://orcid.org/0000-0002-5171-4148>,  spang@mail.hust.edu.cn

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 19 April 2022

Revised: 28 April 2022

Accepted: 18 June 2022

Available online: 15 September 2022

Keywords:

Electron Beam

Electron beam surfacing

Additive technologies

Numerical experiment

Funding

This work was financially supported by the Ministry of Education and Science of Perm Krai (Agreement S-26/508 of 09.03.2021) and the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State Task No. FSNM-2021-0011 and No. FSNM-2020-0028).

Acknowledgements

Research were partially conducted at core facility "Structure, mechanical and physical properties of materials".

ABSTRACT

Introduction. At present, additive technologies are actively developing all over the world and are becoming more and more widely used in industrial production. The use of electron beams in additive processes of directed energy input, the so-called Directed Energy Deposition (DED) technologies, has several advantages, the main ones being the flexibility of controlling the spatial and energy characteristics of the thermal source and the presence of a vacuum protective environment. The standard scheme for additive electron beam deposition is melting of a wire filler material fed from the side into the electron beam affected area, but this additive electron beam deposition pattern does not provide a uniform thermal impact in the deposited area. The most effective method for electron-beam deposition is vertical wire feeding, which provides the most stable formation of the liquid metal bath and, consequently, the deposited beads. At the same time, so far there are no results of numerical analysis of this process in order to determine its main regularities. **The aim of the work** is to carry out numerical experiments for qualitative analysis and determination of the regularities of formation of deposited beads and transfer of filler material, the dependence of the geometric characteristics of the obtained beads on the influence of vapor pressure forces, direction and value of the azimuthal angle of heat sources. **The research methods** were a series of numerical experiments, which analyzed variants of the electron-beam surfacing process at the location of the surfacing rate vector in the action plane of electron beams and perpendicular to this plane to determine the basic regularities of deposited beads formation and transfer of filler material, dependence of geometric characteristics of obtained beads on the influence of vapor pressure forces, direction of heat sources and the azimuth angle of heat sources. **Results and discussion.** It is found that the geometric characteristics of the deposited beads significantly depend on the relative position of the deposition velocity vector with respect to the plane of the electron beams, and consideration of the vapor pressure has a significant influence on the results of numerical simulation of the weld pool formation and the hydrodynamic processes occurring in it. In this case, the location of the deposition velocity vector perpendicular to the action plane of the electron beams, there is a more uniform geometry of the deposited metal beads, and increasing the azimuthal angle of the heat sources increases the probability of spitting to the periphery of the deposited bead, which is associated with limitation of the melt motion in the longitudinal direction by the vapor pressure forces.

For citation: Permyakov G.L., Davlyatshin R.P., Belenkiy V.Y., Trushnikov D.N., Varushkin S.V., Pang S. Numerical analysis of the process of electron beam additive deposition with vertical feed of wire material. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24, no. 3, pp. 6–21. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.3-6-21. (In Russian).

* Corresponding author

Permyakov Gleb L., Ph.D. (Engineering), Researcher,

Perm National Research Polytechnic University

29 Komsomolsky Prospekt,

614990, Perm, Russia

Tel.: +7 (964) 18504-75, e-mail: gleb.permyakov@yandex.ru

References

1. Taminger K.M., Hafley R.A. *Electron beam freeform fabrication (EBF³) for cost effective near-net shape manufacturing*. NASA technical memorandum. NASA/TM-2006-214284URL. Hampton, VA, National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center, 2006. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20060009152> (accessed 23.06.2022).
2. Stecker S. *Electron beam layer manufacturing*. Patent US, no. 2016/0288244 A1, 2016.
3. Taminger K.M., Domack C.S., Zalameda J.N., Taminger B.L., Hafley R.A., Burke E.R. In-process thermal imaging of the electron beam freeform fabrication process. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 2016, vol. 9861, p. 986102. DOI: 10.1117/12.2222439.
4. Fuchs J., Schneider C., Enzinger N. Wire-based additive manufacturing using an electron beam as heat source. *Welding in the World*, 2018, vol. 62, pp. 267–275. DOI: 10.1007/s40194-017-0537-7.
5. Gudenko A.V., Sliva A.P., Dragunov V.K., Shcherbakov A.V. Osobennosti formirovaniya izdelii metodom elektronno-luchevoi naplavki [Features of the formation of products by electron-beam surfacing]. *Svarochnoe proizvodstvo = Welding International*, 2018, no. 8, pp. 12–19. (In Russian).
6. Taminger K.M., Hafley R.A., Fahringer D.T., Martin R.E. Effect of surface treatments on electron beam freeform fabricated aluminum structures. *2004 International Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, TX, 2004, pp. 460–470. DOI: 10.26153/tsw/7012.
7. AWS C7.1M/C7.1:2013. *Recommended practices for electron beam welding and allied processes*. American Welding Society, 2013. 150 p. ISBN 0-87171-721-2.
8. Bird R.K., Atherton T.S. *Effect of orientation on tensile properties of Inconel 718 block fabricated with electron beam freeform fabrication (EBF³)*. NASA Technical Memorandum. NASA/TM-2010-216719. Hampton, VA, National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center, 2010. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20100025706> (accessed 23.06.2022).
9. Wang L., Felicelli S.D., Coleman J., Johnson R., Taminger K.M.B., Lett R.L. Microstructure and mechanical properties of electron beam deposits of AISI 316L stainless steel. *Proceedings of the ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. Vol. 3: *Design and Manufacturing*, Denver, Colorado, USA, 2011, pp. 15–21. DOI: 10.1115/IMECE2011-62445.
10. Ivanchenko V.G., Ivasishin O.M., Semiatin S.L. Evaluation of evaporation losses during electron-beam melting of Ti-Al-V alloys. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2003, vol. 34 (6), pp. 911–915. DOI: 10.1007/s11663-003-0097-7.
11. Wang Y., Fu P., Guan Y., Lu Z., Wei Y. Research on modeling of heat source for electron beam welding fusion-solidification zone. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2013, vol. 26 (1), pp. 217–223. DOI: 10.1016/j.cja.2012.12.023.
12. Chowdhury S., Nirsanametla Y., Muralidhar M. Studies on heat transfer analysis of Ti2AlNb electron beam welds using hybrid volumetric heat source. *Proceedings of the International Congress 2017 of the International Institute of Welding*, 07–09 December 2017, Chennai, India, 2017.
13. Trushnikov D., Perminov A., Belenkiy V., Permyakov G., Kartashov M., Matveev E., Dushina A., Schitsyn Y., Pang S., Karunakaran K.P. Modelling of heat and mass transfer for wire-based additive manufacturing using electric arc and concentrated sources of energy. *International Journal of Engineering and Technology*, 2018, vol. 7, no. 4.38, pp. 741–747. DOI: 10.14419/ijet.v7i4.38.25777.
14. Mladenov G.M., Koleva E.G., Trushnikov D.N. Mathematical modelling for energy beam additive manufacturing. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1089, art. 012001. DOI: 10.1088/1742-6596/1089/1/012001.
15. Trushnikov D.N., Permyakov G.L., Varushkin S.V., Davlyatshin R.V., Bayandin Y.V., Pang S. Improving the electron-beam additive manufacturing growth of components. *Russian Engineering Research*, 2021, vol. 41, no. 9, pp. 874–876. DOI: 10.3103/S1068798X21090276. Translated from *STIN*, 2021, no. 6, pp. 38–40.
16. Brackbill J., Kothe D. Dynamic modeling of the surface tension. *Proceedings of the Third Microgravity Fluid Physics Conference*, Cleveland, OH, NASA Lewis Research Center, 1996, pp. 693–698.
17. Anisimov S.I., Khokhlov V.A. *Instabilities in laser-matter interaction*. Boca Raton, FL, CRC Press, 1995. 141 p. ISBN 0-8493-8660-8.
18. Cho J.-H., Farson D.F., Milewski J.O., Hollis K.J. Weld pool flows during initial stages of keyhole formation in laser welding. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009, vol. 42, no. 17. DOI: 10.1088/0022-3727/42/17/175502.
19. Khairallah S.A., Anderson A.T., Rubenchik A., King W.E. Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter and denudation zones. *Acta Materialia*, 2016, vol. 108 (16), pp. 36–45. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.02.014.

20. Leitz K.-H., Grohs C., Singer P., Tabernig B., Plankensteiner A., Kestler H., Sigl L.S. Fundamental analysis of the influence of powder characteristics in Selective Laser Melting of molybdenum based on a multi-physical simulation model. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2018, vol. 72, pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2017.11.034.

21. Strakhova E.A., Erofeev V.A., Sudnik V.A. Fiziko-matematicheskoe modelirovanie protsessa shirokosloinoi naplavki s poperechnymi kolebaniyami plazmotrona [Physical-mathematical modeling of wide-layer surfacing with transverse oscillations of plasma torch]. *Svarka i diagnostika = Welding and Diagnostics*, 2009, no. 3, pp. 32–38. (In Russian).

22. Semak V., Matsunawa A. The role of recoil pressure in energy balance during laser materials processing. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1997, vol. 30, no. 18, pp. 2541–2552.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2022 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).