

Летягин И.Ю., Трушников Д.Н., Беленький В.Я., Ериков А.П., Ольшанская Т.В. Применение нормализованной диаграммы при моделировании аддитивной наплавки с использованием лучевых источников энергии // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2020. – Т. 22, № 3. – С. 68–75. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.3.09

Letyagin I.Yu., Trushnikov D.N., Belenkiy V.Ya., Erikov A.P., Olshanskaya T.V. Application of the normalized diagram to simulate additive surfacing using energy beam sources. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 68–75. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.3.09

---

**ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение**  
**Т. 22, № 3, 2020**  
**Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science**  
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

---

DOI: 10.15593/2224-9877/2020.3.09  
УДК 621.791

**И.Ю. Летягин<sup>1</sup>, Д.Н. Трушников<sup>1</sup>, В.Я. Беленький<sup>1,2</sup>,  
А.П. Ериков<sup>2</sup>, Т.В. Ольшанская<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия

<sup>2</sup>Пермский военный институт войск национальной гвардии Российской Федерации,  
Пермь, Россия

**ПРИМЕНЕНИЕ НОРМАЛИЗОВАННОЙ ДИАГРАММЫ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ  
АДДИТИВНОЙ НАПЛАВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛУЧЕВЫХ  
ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ**

Активно развивающееся аддитивное производство позволяет использовать для наплавки металлических деталей из порошковых материалов такие лучевые источники энергии, как электронный пучок и лазерный луч. Качество получаемой конструкции зависит от многих факторов, к которым относятся теплофизические свойства порошка и подложки, а также физические процессы взаимодействия энергетических лучей и материалов. Описываемые в литературе методы оценки параметров аддитивных технологий часто затрудняют проверку и прогнозирование результатов вычислений. Предлагаемая в статье методика применения безразмерных параметров в простой аналитической модели нагрева образцов, покрытых слоем порошка, позволяет уменьшить количество переменных. Тепловая модель процесса обеспечивает связь между безразмерными координатами и значениями безразмерной температуры. Также на основе простой аналитической модели нагрева порошковых слоев движущимся линейным источником тепла была построена нормализованная диаграмма для обработки порошкового материала при аддитивных технологиях с использованием концентрированных пучков энергии. Рекомендуемым при селективном плавлении является интервал диаграммы для точек, подверженных обработке, ниже линии максимальной безразмерной температуры, или ниже линии максимальной тепловой эффективности. Диапазон параметров обработки, а также возможность прогнозирования оптимальных параметров энергии электронного пучка или лазерного луча при селективном плавлении могут быть определены в зависимости от безразмерной скорости пучка. Диаграмма представляет полезную справочную информацию и методику, позволяющую подбирать подходящие параметры обработки на ранних этапах разработки не только аддитивного спекания порошковых материалов, но и для оценки глубины нагрева определенного материала. Это может быть использовано при термообработке с использованием лучевых источников энергии.

**Ключевые слова:** аддитивное производство, численное моделирование, аналитическая модель, электронный пучок, лазерный луч, порошок, наплавка, линейный источник тепла, безразмерные параметры, селективное плавление, термический КПД, нормализованная диаграмма.

**I.Yu. Letyagin<sup>1</sup>, D.N. Trushnikov<sup>1</sup>, V.Ya. Belenkiy<sup>1,2</sup>,  
A.P. Erikov<sup>2</sup>, T.V. Olshanskaya<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

<sup>2</sup> Perm Military Institute of National Guard Troops of the Russian Federation,  
Perm, Russian Federation

**APPLICATION OF THE NORMALIZED DIAGRAM TO SIMULATE ADDITIVE  
SURFACING USING ENERGY BEAM SOURCES**

The actively developing additive manufacturing makes it possible to use such beam energy sources as an electron beam and a laser beam for surfacing metal parts from powder materials. The quality of the resulting structure depends on many factors. These factors include the thermo physical properties of the powder and substrate, as well as the physical processes of the interaction of energy beams and materials. Methods for

estimating the parameters of additive technologies described in the literature often make it difficult to verify and predict the results of calculations. The proposed method for the use of dimensionless parameters in a simple analytical model for heating samples coated with a layer of powder makes it possible to reduce the number of variables. The thermal model of the process provides a connection between the dimensionless coordinates and the values of the dimensionless temperature. A normalized diagram was built for the processing of a powder material with additive technologies using concentrated energy beams. The diagram is constructed on the basis of a simple analytical model of heating powder layers by a moving linear heat source. Recommended for selective melting is the interval of the diagram for points subject to processing below the line of maximum dimensionless temperature or below the line of maximum thermal efficiency. The range of processing parameters, as well as the ability to predict the optimal energy parameters of an electron beam or a laser beam, with selective melting can be determined depending on the dimensionless beam velocity. The diagram represents useful background information and methodology to select the appropriate processing parameters in the early stages of development not only the sintering additive powder materials, but also to assess the depth of heating of a particular material. It can be used in the heat treatment using the energy beam sources.

**Keywords:** additive manufacturing, numerical modeling, analytical model, electron beam, laser beam, powder, surfacing, linear heat source, dimensionless parameters, selective melting, thermal efficiency, normalized diagram.

## Введение

Аддитивное производство (АП) представляет собой процесс создания трехмерных объектов путем послойного формирования. АП – это быстро развивающийся производственный процесс, имеющий значительный потенциал для снижения стоимости производства, энергопотребления и воздействия на окружающую среду. В качестве концентрированного энергетического пучка в аддитивном производстве может использоваться электронный пучок, лазерный луч или плазменный поток.

Несмотря на преимущества в конструкции и стоимости, АП с использованием металлических материалов находится на начальной стадии развития. Это связано с ограниченными знаниями о совокупности физических процессов при АП и более сложных, чем при традиционных производственных процессах. К влияющим на эти процессы факторам относятся: взаимодействие энергетических лучей и материалов, теплообмен и поток расплавленного металла, фазовые превращения, термические напряжения и деформации. Все эти факторы влияют на качество полученного изделия и свойства материала [1–3] полученной конструкции.

Комплексный обзор аддитивного производства из металлических изделий приведен в работе [4]. Многие существующие и легко реализуемые программные пакеты могут помочь понять некоторые функции процесса [5–8]. В работе [5] применяются методы теплопроводности и конечных элементов. В источнике [6] компьютерное моделирование основано на алгоритме теплопереноса и течения жидкости. В работе [7] используется метод набора уровней. В источнике [8] объем жидкости моделируется с использованием метода конечных разностей. Применение метода решеточных уравнений Больцмана и произвольного Лагранж – Эйлера поведения представлено в работе [9]. Наличие различных допущений, таких как отсутствие учета некоторых физических явлений в моделировании и отсутствие данных о некоторых элементах процессов (градиент температур на поверхности жидкой ванны, роль примесей сплава в поверхностном

натяжении, вязкость и различная неустойчивость в потоках расплавленной ванны и т.д.), часто затрудняет проверку и прогнозирование результатов вычислений.

В этой статье представлена простая аналитическая модель нагрева образцов, покрытых слоем порошка, а также используются известные безразмерные параметры, которые могут уменьшить общее количество рассматриваемых переменных. Таким образом, важно понимать, что зависимости между отдельными переменными процесса не могут быть найдены. Во время АП расплавленная ванна мала и градиенты температур в твердом образце (слой порошка и основной материал) обусловлены размерами расплавленной ванны. Эти градиенты температур объясняют распространение остальной поглощенной энергии, которая не используется для плавления, за счет влияния теплопроводности. В случае селективного плавления последовательно расположенных порошковых слоев при получении конструкций подложка также нагревается. Температура селективно расплавленной области определяется увеличением температуры подложки до температуры плавления обрабатываемого порошка.

## Термическая модель

Решение уравнения теплового баланса при нагреве порошкового слоя толщиной  $L$  линейным движущимся тепловым источником с постоянной энергией  $P$ , скоростью  $V$  (рис. 1), при условии отсутствия фазовых изменений в образце при теплопередаче и при известных физических параметрах материала: теплопроводность  $\lambda$ , температуропроводность  $a$  ( $a = \lambda / (C\rho)$ , где  $C$  – удельная теплоемкость,  $\rho$  – плотность слоя порошка), примет вид [20]

$$T = \frac{P}{2\pi\lambda L} \exp\left(-\frac{Vx}{2a}\right) K_0\left(\frac{Vr}{2a}\right) + T_0, \quad (1)$$

где  $T$  – температура исследуемой точки;  $T_0$  – температура подложки (начальная температура);  $x$  – расстояние от движущегося центра;  $r$  – радиус-вектор,

движущийся вместе с источником тепла;  $K_0$  – модифицированная функция Бесселя второго рода нулевого порядка.

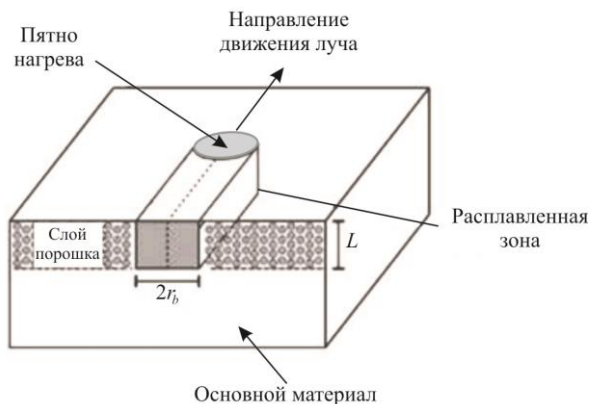


Рис. 1. Определение параметров геометрии при селективном плавлении первого порошкового слоя:  $2r_b$  – диаметр пятна нагрева;  $L$  – толщина слоя порошка

Заметим, что  $P$  – поглощенная энергия луча (энергия пучка  $P_b$  с учетом потери энергии за счет обратного рассеяния и вторичных электронов в случае электронного пучка, а в случае лазерного луча – поверхностного поглощения энергии, или коэффициента связи). Чтобы свести к минимуму влияние температурной зависимости тепловых констант, значения  $\lambda$ ,  $C$  и  $a$  взяты для промежуточной температуры (между начальными температурами  $T_0$  и температуры плавления  $T_m$ ), а процесс теплопроводности считается не зависящим от температуры. Из равенства к нулю первой производной теплового цикла для точки выборки видно, что все точки из движущейся системы координат с максимальными температурами задаются

$$\cos(\varphi) = \frac{-K_0(rV/2a)}{K_1(rV/2a)} \quad (2)$$

или из условий геометрии:

$$\sin(\varphi) = \left\{ 1 - \left[ \frac{K_0(rV/2a)}{K_1(rV/2a)} \right]^2 \right\}^{-1/2}, \quad (2a)$$

где  $K_1(rV/2a) = K_0'(rV/2a)$  – модифицированная функция Бесселя второго рода первого порядка и  $rV/2a$  – число Пекле (безразмерное) расстояний до источника тепла, которое имеет значения, пропорциональные скорости движения. Тогда из формул (1) и (2) можно найти безразмерную максимальную температуру  $\theta_m$ :

$$\begin{aligned} \theta_m &= \frac{2\pi\lambda L(T_m - T_0)}{P} = \\ &= K_0(rV/2a) \exp\left[ \frac{(rV/2a)K_0(rV/2a)}{K_1(rV/2a)} \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

Функция безразмерных параметров  $\theta_m(rV/2a)$  является более практичной и может быть найдена с помощью итераций из выражения (3) с учетом выражения (2a), при этом учитывается, что  $y = b/2 = r\sin\varphi$ , где  $b$  – ширина расплавленного и затвердевшего слоя. Эта функция приведена на рис. 2 для диапазона  $Vy/2a$ , который подходит для нагрева луча на малых расстояниях от движущегося линейного источника нагрева [21].

Другой вид  $Y(X)$  этого соотношения приведен также на рис. 2 с использованием наклонных безразмерных координат  $X = P/L\lambda(T_m - T_0)$  и  $Y = Vb/2a$ .

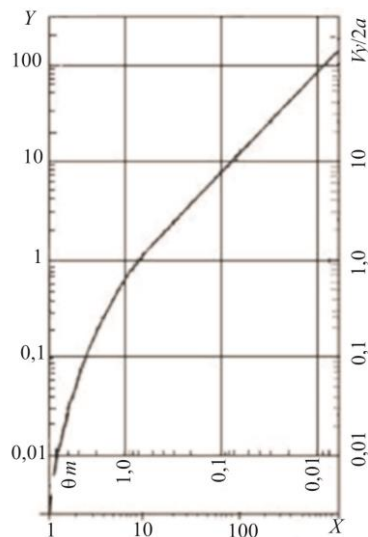


Рис. 2. Зависимость максимальной безразмерной температуры  $\theta_m$  от безразмерных расстояний  $Vy/2a$  с безразмерными координатами  $Y = Y(X)$  (наклонены на  $90^\circ$ )

Термический КПД  $\eta_r$  процесса нагрева порошкового слоя концентрированным пучком энергии, который в нашем случае является отношением энергии, необходимой только для плавления материала, к суммарной энергии, подаваемой пучком (в  $P$  следует принимать во внимание учет эффективности электронов  $\eta_e$  или коэффициент связи лазерного луча), рассчитывается как

$$\eta_r = \frac{VFS}{P}, \quad (4)$$

где  $S$  – энтальпия расплавленного материала в сварном шве при повышении температуры между начальной температурой  $T_0$  и температурой плавления  $T_m$ :

$$S = C(T_m - T_0) + H_f \approx 1,5C(T_m - T_0), \quad (5)$$

где  $C$  – средняя удельная теплоемкость для температурного диапазона между данными значениями температуры, а  $H_f$  – теплота плавления.

Хорошо видно, что термический КПД  $\eta_t$  можно оценить как отношение  $Y/X$ .

В работе [21] этот подход применялся последовательно для прогнозирования оптимальных режимов при электронно-лучевой сварке.

### Экспериментальные данные

В табл. 1 приведены теплофизические параметры порошковых материалов некоторых более важных металлических сплавов, используемых для моделирования параметров аддитивного производства. В табл. 2 приведены некоторые экспериментальные данные для режимов избирательного плавления электронным пучком и лазерным лучом, при этом значение  $X$  определяется как

$$X = \frac{(0,6P)}{L\lambda(T_m - T_0)}. \quad (6)$$

Поглощающая способность поверхности (эффективность электронов для электронных пучков или коэффициент связи для лазерных лучей) принималась равной 0,6. Максимальная безразмерная температура

$$\theta_m = 2\pi/X. \quad (7)$$

В табл. 1 значения теплопроводности  $\lambda$  для порошков составляют порядка 10 % от значений для

сыпучего материала, а значения плотности  $\rho$  порошковых слоев предполагаются как 67–75 % от плотности объема наплавки.

На рис. 3 приведены функция  $\theta_m (rV/2a)$  и экспериментальные точки, представляющие режимы селективного плавления некоторых порошковых слоев промышленных сплавов. Наклонная линия на рис. 3 обозначает максимальный термический КПД 48,45 % [20]. Это теоретический предел для отношения количества поглощенной энергии, использованной для плавления материала при нагревании образцов путем перемещения линейного источника нагрева к общей поглощенной энергии.

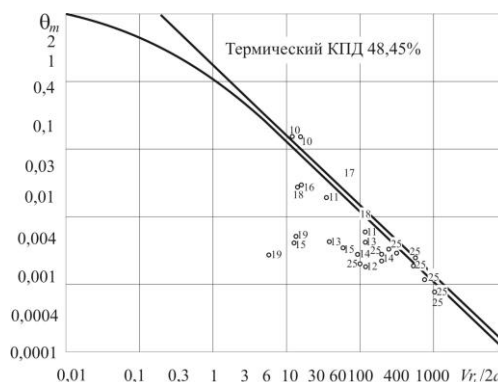


Рис. 3. Нормализованная диаграмма обработки из функции  $\theta_m (rV/2a)$  и экспериментальные данные для селективного плавления: • – Ti–6Al–4V; \* – SS 316L; x – Inconel 625; + – CM247 и o – FeCoCrNi. Ссылки цитирования (для этих данных) отмечены цифрами

Таблица 1

Теплофизические параметры для порошковых слоев из сплавов, используемых для плавления энергией пучка

Порошок	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$C$ , Дж/(кг·К)	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$a = \lambda/C\rho$ , м <sup>2</sup> /с	$T_m$ , К
Ti–6Al–4V	0,63	530	3000	$0,396 \cdot 10^{-6}$	1604
SS 316L	1,63	500	6000	$0,543 \cdot 10^{-6}$	1370
Inconel 625	2,52	620	6000	$0,677 \cdot 10^{-6}$	1605
CM 247	1,54	320	6000	$0,802 \cdot 10^{-6}$	1612
FeCoCrNi	1,8	450	5800	$0,69 \cdot 10^{-6}$	1600

Таблица 2

Экспериментальные данные для аддитивного производства металлических деталей в порошковом слое

Сплав	Пучок	$T_0$ , К	$L$ , м	$r_b/V$ , м, м/с	$P$ , Вт	$\lambda$	$Vr_b/2a$	$\theta_m$	Ссылка
Ti–6Al–4V	Эл. пучок	923	–	$150 \cdot 10^{-6}/-$	600	71,54	11,85	0,0878	[10]
Ti–6Al–4V	Эл. пучок	923	–	$150 \cdot 10^{-6}/-$	600	71,54	16,3	0,0878	[10]
Ti–6Al–4V	Эл. пучок	923	$50 \cdot 10^{-6}$	$150 \cdot 10^{-6}/0,2$	60	559,87	37,87	0,0112	[11]
Ti–6Al–4V	Эл. пучок	923	$50 \cdot 10^{-6}$	$150 \cdot 10^{-6}/6,4$	1400	1306,38	212,21	0,048	[11]
Ti–6Al–4V	Лазер	298	$30 \cdot 10^{-6}$	$52 \cdot 10^{-6}/1,6$	250	3505,94	104,51	0,0018	[12]
Ti–6Al–4V	Лазер	298	$20 \cdot 10^{-6}$	$75 \cdot 10^{-6}/0,8$	150	1458,67	52,52	0,0043	[13]
Ti–6Al–4V	Лазер	298	$20 \cdot 10^{-6}$	$75 \cdot 10^{-6}/1,5$	200	1944,9	142,04	0,003 23	[13]
Ti–6Al–4V	Лазер	498	$30 \cdot 10^{-6}$	$70 \cdot 10^{-6}/0,7$	175	2152,76	92,8	0,002 92	[14]

Сплав	Пучок	$T_0$ , К	$L$ , м	$r_b / V$ , м, м/с	$P$ , Вт	$\lambda$	$Vr_b/2a$	$\theta_m$	Ссылка
Ti-6Al-4V	Лазер	498	$90 \cdot 10^{-6}$	$120 \cdot 10^{-6} / 1,029$	375	2690,76	92,8	0,002 33	[14]
Ti-6Al-4V	Эл. пучок	730	$86 \cdot 10^{-6}$	$50 \cdot 10^{-6} / 1,6$	160	3479,02	101	0,0018	[25]
Ti-6Al-4V	Эл. пучок	730	$86 \cdot 10^{-6}$	$200 \cdot 10^{-6} / 0,8$	240	2609,26	202,02	0,0024	[25]
Ti-6Al-4V	Эл. пучок	730	$86 \cdot 10^{-6}$	$150 \cdot 10^{-6} / 1,6$	320	3219,34	303,03	0,0027	[25]
Ti-6Al-4V	Эл. пучок	730	$86 \cdot 10^{-6}$	$200 \cdot 10^{-6} / 1,6$	480	2609,26	404,04	0,0024	[25]
Ti-6Al-4V	Эл. пучок	730	$86 \cdot 10^{-6}$	$250 \cdot 10^{-6} / 1,6$	640	2782	505,05	0,002 25	[25]
Ti-6Al-4V	Эл. пучок	730	$86 \cdot 10^{-6}$	$200 \cdot 10^{-6} / 2,4$	720	3913,9	606,06	0,0016	[25]
Ti-6Al-4V	Эл. пучок	730	$86 \cdot 10^{-6}$	$150 \cdot 10^{-6} / 4,0$	800	5798,36	757,57	0,011	[25]
Ti-6Al-4V	Эл. пучок	730	$86 \cdot 10^{-6}$	$150 \cdot 10^{-6} / 5,6$	1120	81 17,71	1060	0,000 774	[25]
Ti-6Al-4V	Эл. пучок	730	$86 \cdot 10^{-6}$	$150 \cdot 10^{-6} / 8,0$	1600	11 596,72	1515,15	0,000 542	[25]
SS316L	Лазер	298	$30 \cdot 10^{-6}$	$27 \cdot 10^{-6} / 0,5$	150	1910,83	12,424	0,003 29	[15]
SS316L	Лазер	298	$30 \cdot 10^{-6}$	$27 \cdot 10^{-6} / 2,5$	400	2123,14	62,12	0,002 96	[15]
SS316L	Лазер	298	$50 \cdot 10^{-6}$	$100 \cdot 10^{-6} / 0,2$	97	333,71	18,4	0,019	[16]
Inconel625	Лазер	298	$100 \cdot 10^{-6}$	$850 \cdot 10^{-6} / 0,11$	900	209,43	69,26	0,03	[17]
CM247	Лазер	298	$20 \cdot 10^{-6}$	$75 \cdot 10^{-6} / 0,4$	100	395,26	18,7	0,016	[18]
CM247	Лазер	298	$20 \cdot 10^{-6}$	$75 \cdot 10^{-6} / 2$	200	790,51	93,52	0,007 94	[18]
FeCoCrNi	Лазер	298	$20 \cdot 10^{-6}$	$25 \cdot 10^{-6} / 0,33$	200	3015,075	5,98	0,002 08	[19]
FeCoCrNi	Лазер	298	$50 \cdot 10^{-6}$	$25 \cdot 10^{-6} / 0,66$	200	1205,545	11,96	0,005 209	[19]

### Обсуждение методики

Нормализованная диаграмма обработки на рис. 3 отображает безразмерную максимальную температуру и безразмерную скорость пучка. Безразмерные числа полезны, поскольку они уменьшают общее число переменных, подлежащих изучению, и обеспечивают важное понимание процесса, которое одна технологическая переменная не может обеспечить.

Позиции точек измерения безразмерной обработки должны быть выбраны в окне параметров обработки, которое представляет собой область ниже функции  $\theta_m (rV/2a)$ , показанной на рис. 3. Область режима обработки, расположенная ниже линии максимальной безразмерной температуры (или максимального термического КПД), дает возможность прогнозировать возможные оптимальные параметры, используемые при селективном плавлении энергией пучка. Оптимальное место точки режима для процесса нагрева при селективном плавлении порошковых слоев с помощью энергии пучка – это положение как можно ближе к предельному значению, задаваемому функцией  $\theta_m (rV/2a)$ . Точки из рис. 3 с безразмерными параметрами режима, расположенными над этой линией, можно объяснить следующим образом. Точки из статьи [10] были рассчитаны авторами этой статьи, также в статье отсутствуют данные, что не позволяет понять причину этих расхождений. Точка для режима лазерного селективного плавления из статьи [17] представляет собой процесс со слишком большим пятном луча. Тепловая модель с движущимся линейным источником нагрева не дает хороших результатов в этом

случае. Объяснение положения одной точки из режимов аддитивного производства с использованием электронного пучка из статьи [25], где  $r_b$  составляет  $250 \cdot 10^{-6}$  м, может быть аналогичным. Процессы в жидком металле и размеры расплавленной ванны в этих случаях более важны для полученных результатов и оценки термического КПД процесса.

Отметим, что одна и та же аналитическая модель нагрева последовательно применялась также в источниках [22–24] для оценки глубины сварного шва при термической модификации поверхности электронным пучком и при электронно-лучевой сварке тонких пластин при режимах, приводящих к сферическим сечениям сварных швов. С использованием значений известных  $\theta_m$  для заданных значений  $P$  и  $L$ , при этом  $L$  – толщина свариваемых тонких пластин или длина сканирования пучком, кривая на рис. 2 дает возможность определить глубину нагрева определенного материала до некоторой температуры (например, температуры плавления при сварке или температуры фазового превращения при закалке).

### Выводы

Аналитическая модель для нагрева твердых образцов движущимся линейным источником тепла, которая уже была изложена авторами для электронно-лучевой сварки [21], адаптирована для образцов, покрытых порошковым слоем. Построена и обсуждена нормализованная диаграмма обработки порошкового слоя концентрированными пучками энергии при аддитивном производстве. В сочетании с данными экспериментальных параметров, доступными в литературе, была исследована

применимость этой диаграммы и продемонстрировано окно параметров обработки.

Предполагается, что эти диаграммы обработки предоставят полезную информацию для практикующих ученых и инженеров при выборе соответствующих параметров обработки для экспериментов на ранних этапах программ исследований и разработок технологий.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках научного проекта № С-26/794.*

#### Список литературы

1. Korner C., Bauereiss A., Attar E. Fundamental consolidation mechanisms during selective beam melting of powders // *Modell. and Simul. in Materials Sci. and Eng.* – 2013. – Vol. 21, art. no. 085011. – P. 8.
2. Klassen A., Bauereiss A., Korner C. Modelling of electron beam absorption in complex geometries // *J. of Phys.: Appl. Phys.* – 2014. – Vol. 47, iss. 6. – P. 065307.
3. Overview of modelling and simulation of metal powder bed fusion process / W. King, A.T. Anderson, R.M. Ferencz, N.E. Hodge, C. Kamath, S.A. Khairallah // *Lawrence Livermore National Laboratory Materials Sci. and Techn. (United Kingdom).* – 2015. – Vol. 31. – P. 957–968.
4. Additive manufacturing of metallic components—process, structure and properties / T. DebRoy, H.L. Wei, J.S. Zuback, T. Mukherjee, J.W. Elmer, J.O. Milewski, A.M. Beese, A. Wilson-Heid, A. De, W. Zhang // *Progress in Materials Sci.* – 2018. – Vol. 92. – P. 112–224.
5. Contuzzi N., Campanelli S.L., Ludovico A.D. 3D-finite element analysis in the selective laser melting process // *Int. J. of Simul. Modell.* – 2011. – Vol. 10 (3). – P. 113–121.
6. Manvatkar V., De A., DebRoy T. Spatial variation of melt pool geometry, peak temperature and solidification parameters during laser assisted additive manufacturing process // *Materials Sci. and Eng.* – 2015. – Vol. 31(8). – P. 924–930.
7. Wen S.Y., Shin Y.C. Modeling of transport phenomena during the coaxial laser direct deposition process // *J. Appl. Phys.* – 2010. – Vol. 108. – P. 044908.
8. Effect of fluid convection on dendrite arm spacing in laser deposition / Y. Lee, M. Nordin, S.S. Babu, D.F. Farson // *Metall. and Materials Trans.* – 2014. – Vol. B 45 (4). – P. 1520–1529.
9. Korner C., Attar E., Heintz P. Mesoscopic simulation of selective beam melting processes // *J. of Materials Proc. Techn.* – 2011. – Vol. 211(6). – P. 978–987.
10. Thomas M., Baxter G.J., Todd I. Normalised model-based processing diagrams for additive layer manufacture of engineering alloys // *Acta Mater.* – 2016. – Vol. 108. – P. 26–35.
11. Processing window and evaporation phenomena for Ti–6Al–4V produced by selective electron beam melting / V. Juechter, T. Scharowsky, R. Singer, C. Korner // *Acta Materialia.* – 2014. – Vol. 76. – P. 252–258.
12. Humbeeck Microstructure and mechanical properties of a novel  $\beta$  titanium metallic composite by selective laser-melting / B. Vrancken, L. Thijs, J.P. Kruth, J. Van // *Acta Materialia.* – 2014. – Vol. 68. – P. 150–158.
13. Qiu C., Adkins N.J.E., Attallah M.M. Microstructure and tensile properties of selectively laser-melted and of HIPed laser-melted Ti–6Al–4V // *Materials Sci. and Eng.* – 2013. – Vol. A 578. – P. 230–239.
14. Additive manufacturing of strong and ductile Ti–6Al–4V by selective laser melting via in situ martensite decomposition / W. Xu, M. Brandt, S. Sun, J. Elambasseril, Q. Liu, K. Latham, K. Xia, M. Qian // *Acta Materialia.* – 2015. – Vol. 85. – P. 74–84.
15. Density of additively-manufactured, 316L SS parts using laser powder-bed fusion at powers up to 400 W. / C. Kamath, B. El-dasher, G.F. Gallegos, W.E. King, A. Sisto // *Int. J. of Adv. Manuf. Techn.* – 2014. – Vol. 74. – P. 65–78.
16. Application of X-ray CT method for discontinuity and porosity detection in 316L stainless steel parts produced with SLM technology / G. Ziolkowski, E. Chlebus, P. Szymczyk, J. Kurzac // *Archives of Civil and Mech. Eng.* – 2014. – Vol. 14, iss. 4. – P. 608–614.
17. Additive layer manufacture of inconel 625 metal matrix composites, reinforcement material evaluation / D.E. Cooper, N. Blundell, S. Maggs, G.J. Gibbons // *J. of Materials Proc. Techn.* – 2013. – Vol. 213, no 12. – P. 2191–2200.
18. The influence of the laser scan strategy on grain structure and cracking behaviour in SLM powder-bed fabricated nickel superalloy / L.N. Carter, C. Martin, P.J. Withers, M.M. Attallah // *J. of Alloys and Comp.* – 2014. – Vol. 615. – P. 338–347.
19. Brif Y., Thomas M., Todd I. The use of high-entropy alloys in additive manufacturing // *Scripta Materialia.* – 2015. – Vol. 99. – P. 93–96.
20. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. – М.: Гос. науч.-техн. изд-во машиностроит. лит., 1951. – 296 с.
21. Koleva E., Mladenov G., Vutova K. Calculation of weld parameters and thermal efficiency in electron beam welding // *Vacuum.* – 1999. – Vol. 53. – P. 67–70.
22. Дворкин И.И., Ледовской В.П., Младенов Г.М. Электронно-лучевая сварка тонкостенных деталей в непрерывном режиме // *Электронная техника.* – 1972. – Сер. 4, № 3. – С. 53–59.
23. Petrov P., Mladenov G. Theoretical analysis of heat flow and structural changes during electron beam irradiation of steel // *Vacuum.* – 1990. – Vol. 42, no 1/2. – P. 29–32.
24. Koleva E., Mladenov G. Process parameter optimization and quality improvement at electron beam welding // *Welding: Proc., Quality and Appl.* – 2010. – Chapter 2. – P. 101–166. (Seria "Mechanical Engineering-Theory and Applications".)
25. Macroscopic simulation and experimental measurement of melt pool characteristics in selective electron beam melting of Ti–6Al–4V / D. Riedlbauer, T. Scharowsky, R.F. Singer, P. Steinmann, C. Korner, J. Mergheim // *Int. J. of Adv. Manuf. Techn.* – 2017. – Vol. 88 (5–8). – P. 1309–1317.

## References

1. Korner C., Bauereiss A., Attar E. Fundamental consolidation mechanisms during selective beam melting of powders. *Modeling and simulation in transforming modern materials science*, 2013, vol. 21, art. no. 085011, p. 8.
2. Klassen A., Bauereiss A., Korner C. Modelling of electron beam absorption in complex geometries. *Journal of Physics: Applied Physics*, 2014, vol. 47, iss. 6, pp. 065307.
3. King W., Anderson A.T., Ferencz R.M., Hodge N.E., Kamath C., Khairallah S.A. Overview of modelling and simulation of metal powder bed fusion process. *Lawrence Livermore National Laboratory Materials Science and Techn. (United Kingdom)*, 2015, vol. 31, pp. 957–968.
4. DebRoy T., Wei H.L., Zuback J.S., Mukherjee T., Elmer J.W., Milewski J.O., Beese A.M., Wilson-Heid A., De A., Zhang W. Additive manufacturing of metallic components—process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 2018, vol. 92, pp. 112–224.
5. Contuzzi N., Campanelli S.L., Ludovico A.D. 3D-finite element analysis in the selective laser melting process. *International Journal of Simul. Modell.*, 2011, vol. 10 (3), pp. 113–121.
6. Manvatkar V., De A., DebRoy T. Spatial variation of melt pool geometry, peak temperature and solidification parameters during laser assisted additive manufacturing process. *Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 31(8), pp. 924–930.
7. Wen S.Y., Shin Y.C. Modeling of transport phenomena during the coaxial laser direct deposition process. *Journal Applied Physics*, 2010, vol. 108, p. 044908.
8. Lee Y., Nordin M., Babu S.S., Farson D.F. Effect of fluid convection on dendrite arm spacing in laser deposition. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2014, vol. B 45 (4), pp. 1520–1529.
9. Korner C., Attar E., Heinel P. Mesoscopic simulation of selective beam melting processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, vol. 211(6), pp. 978–987.
10. Thomas M., Baxter G.J., Todd I. Normalised model-based processing diagrams for additive layer manufacture of engineering alloys. *Acta Materialia*, 2016, vol. 108, pp. 26–35.
11. Juechter V., Scharowsky T., Singer R., Korner C. Processing window and evaporation phenomena for Ti–6Al–4V produced by selective electron beam melting. *Acta Materialia*, 2014, vol. 76, pp. 252–258.
12. Vrancken B., Thijs L., Kruth J.P., Van J. Humbeeck. Microstructure and mechanical properties of a novel  $\beta$  titanium metallic composite by selective laser-melting. *Acta Materialia*, 2014, vol. 68, pp. 150–158.
13. Qiu C., Adkins N.J.E., Attallah M.M. Microstructure and tensile properties of selectively laser-melted and of HIPed laser-melted Ti–6Al–4V. *Materials Science and Engineering*, 2013, vol. A 578, pp. 230–239.
14. Xu W., Brandt M., Sun S., Elambasseril J., Liu Q., Latham K., Xia K., Qian M. Additive manufacturing of strong and ductile Ti–6Al–4V by selective laser melting via in situ martensite decomposition. *Acta Materialia*, 2015, vol. 85, pp. 74–84.
15. Kamath C., El-dasher B., Gallegos G.F., King W.E., Sisto A. Density of additively-manufactured, 316L SS parts using laser powder-bed fusion at powers up to 400 W. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 74, pp. 65–78.
16. Ziolkowski G., Chlebus E., Szymczyk P., Kurzac J. Application of X-ray CT method for discontinuity and porosity detection in 316L stainless steel parts produced with SLM technology. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2014, vol. 14, iss. 4, pp. 608–614.
17. Cooper D.E., Blundell N., Maggs S., Gibbons G.J. Additive layer manufacture of inconel 625 metal matrix composites, reinforcement material evaluation. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, vol. 213, no 12, pp. 2191–2200.
18. Carter L.N., Martin C., Withers P.J., Attallah M.M. The influence of the laser scan strategy on grain structure and cracking behaviour in SLM powder-bed fabricated nickel superalloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, vol. 615, pp. 338–347.
19. Brif Y., Thomas M., Todd I. The use of high-entropy alloys in additive manufacturing. *Scripta Materialia*, 2015, vol. 99, pp. 93–96.
20. Rykalin N.N. Raschety teplovykh protsessov pri svarke [Calculations of thermal processes at welding]. Moscow: Gosudrsvvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo mashinostroitel'naia literatura, 1951, 296 p.
21. Koleva E., Mladenov G., Vutova K. Calculation of weld parameters and thermal efficiency in electron beam welding. *Vacuum*, 1999, vol. 53, pp. 67–70.
22. Dvorkin I.I., Ledovskoi V.P., Mladenov G.M. Elektronno-luchevaia svarka tonkostennykh detalei v nepreryvnom rezhime [Electron-beam welding of thin-walled parts in continuous mode]. *Elektronnaiia tekhnika*, 1972, Ser. 4, no. 3, pp. 53–59.
23. Petrov P., Mladenov G. Theoretical analysis of heat flow and structural changes during electron beam irradiation of steel. *Vacuum*, 1990, vol. 42, no ½, pp. 29–32.
24. Koleva E., Mladenov G. Process parameter optimization and quality improvement at electron beam welding. *Welding: Proc., Quality and Appl.*, 2010. Chapter 2, pp. 101–166. (Seria Mechanical Engineering-Theory and Applications.)
25. Riedlbauer D., Scharowsky T., Singer R.F., Steinmann P., Korner C., Mergheim J. Macroscopic simulation and experimental measurement of melt pool characteristics in selective electron beam melting of Ti–6Al–4V. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 88 (5–8), pp. 1309–1317.

Получено 23.07.2020

Опубликовано 12.10.1010

## Сведения об авторах

**Летягин Игорь Юрьевич** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: letyagin@pstu.ru.

**Трушников Дмитрий Николаевич** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: trdimitr@yandex.ru.

**Беленький Владимир Яковлевич** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; профессор кафедры эксплуатации автобронетанковой техники Пермского военного института войск национальной гвардии Российской Федерации; e-mail: vladimirbelenkij@yandex.ru.

**Ериков Алексей Петрович** (Пермь, Россия) – доцент кафедры эксплуатации автобронетанковой техники Пермского военного института войск национальной гвардии Российской Федерации; e-mail: yerikov@yandex.ru.

**Ольшанская Татьяна Васильевна** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: tvo66@mail.ru.

#### **About the authors**

**Igor Yu. Letyagin** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials,

Perm National Research Polytechnic University; e-mail: letyagin@pstu.ru.

**Dmitriy N. Trushnikov** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: trdimitr@yandex.ru.

**Vladimir Ya. Belenkiy** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; Professor, Department of Operation of Armored Vehicles, Perm Military Institute of National Guard Troops of the Russian Federation, e-mail: vladimirbelenkij@yandex.ru.

**Aleksei P. Erikov** (Perm, Russian Federation) – Associate Professor, Department of Operation of Armored Vehicles, Perm Military Institute of National Guard Troops of the Russian Federation, e-mail: yerikov@yandex.ru.

**Tatiana V. Olshanskaya** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: tvo66@mail.ru.