

УДК.621.791.927.55

**Донгаузер К.А.<sup>1</sup>, Бояршинов М.Г.<sup>2</sup>, Бекмансуров М.Р.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>АО «ОДК-Авиадвигатель», г. Пермь, Россия

<sup>2</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ В АДДИТИВНОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ ЛАЗЕРНОЙ ПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКИ**

В данной статье рассматривается моделирование напряженно-деформированного состояния изделий при лазерной порошковой наплавке на примере ступенчатого трубчатого образца. Для калибровки модели был проведен ряд экспериментов с использованием присадочного порошка фракционного состава 40–80 мкм. При лазерной порошковой наплавке образцов проводилось двухточечное термометрирование, необходимое для последующей калибровки температурной задачи. Наплавка порошка проводилась в один слой с паузами между наплавленными дорожками согласно режимам наплавки. В качестве защитного газа были использованы гелий и аргон.

Создание прикладного инструмента предварительной численной оценки коробления и остаточных напряжений в заготовках и ДСЕ перед проведением ремонтных технологических операций методом порошковой лазерной наплавки, позволяющего проводить оперативные приближенные расчеты, было основной задачей работы.

В модели рассматривался метод *element birth/death*, позволяющий реализовать появление тел наплавки и являющийся наиболее удобным в данном случае. Моделирование короблений проводилось путем разделения наплавленной части на дорожки, которые, в свою очередь, делятся на тела наплавки. Следующим этапом служит нагрев и охлаждение каждого элементарного тела по траектории наплавки, взамен моделирования перемещающегося источника тепла. Командные вставки позволяют регулировать траекторию наплавки с помощью автоматической нумерации элементарных тел. Предложенная методика позволяет быстро препроцессировать задачу и получить достаточно точные результаты расчета за короткое время.

Проводилось сравнение результатов моделирования и реальной лазерной порошковой наплавкой. Верификация разрабатываемой модели была произведена с помощью оцифрованной внешней поверхности существующих экспериментальных образцов после наплавки. Расчеты показывают достаточную вычислительную точность модели, однако, использование высокотемпературных свойств материала порошка позволит уменьшить погрешность вычислений.

**Ключевые слова:** лазерная порошковая наплавка, моделирование, коробления, напряженно-деформированное состояние, термометрирование, смерть/рождение элементов, связанные задачи, температурные деформации, ремонтные технологии, перемещающийся источник тепла.

**Dongauser K.A.<sup>1</sup>, Boyarshinov M.G.<sup>2</sup>, Bekmansurov M.R.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Joint Stock Company «UEC-Perm motors», Perm, Russian Federation

<sup>2</sup> Perm National Research Politechnic University, Perm, Russian Federation

## **NUMERICAL SIMULATION OF WELDING DISTORTION IN LASER METAL DEPOSITION ADDITIVE MANUFACTURING PROCESS**

This article discusses the modeling of the stress-strain state of products during laser powder surfacing using the example of a stepped tubular sample. To calibrate the model, a number of experiments were carried out using an additive powder with a fractional composition of 40–80 μm. During laser powder surfacing of samples, two-point thermometry was carried out, which is necessary for the subsequent calibration of the temperature problem. Powder surfacing was carried out in one layer with pauses between the deposited paths according to the surfacing modes. Helium and argon were used as shielding gases.

The creation of an applied tool for the preliminary numerical assessment of warpage and residual stresses in blanks and DSE before carrying out repair technological operations using the powder laser cladding method, which allows for prompt approximate calculations, was the main task of the work.

In the model, the element birth/death method was considered, which makes it possible to implement the appearance of hardfacing bodies and is the most convenient in this case. Warping modeling was carried out by dividing the welded part into tracks, which, in turn, are divided into hardfacing bodies. The next stage is the heating and cooling of each elementary body along the surfacing trajectory, instead of modeling a moving heat source. Command inserts allow you to adjust the surfacing tra-

jectory using automatic numbering of elementary bodies. The proposed technique makes it possible to quickly preprocess the problem and obtain sufficiently accurate calculation results in a short time.

The results of modeling and real laser powder surfacing were compared. Verification of the developed model was carried out using the digitized outer surface of the existing experimental samples after surfacing. Calculations show sufficient computational accuracy of the model, however, the use of high-temperature properties of the powder material will reduce the calculation error.

**Keywords:** laser powder surfacing, modeling, warpage, stress-strain state, thermometry, death / birth of elements, related tasks, temperature deformations, repair technologies, moving heat source.

## 1 Введение

В процессе лазерной порошковой наплавки существует проблема коробления изделий под действием высокотемпературных воздействий [1, 2]. При разработке технологического процесса ремонта деталей методом лазерной порошковой наплавки одной из целей является возможность прогнозирования дефектов коробления [3–5]. Определение оптимального бездефектного режима наплавки конкретных деталей экспериментальным путем является невыгодным, в связи с высокими финансовыми и временными затратами, а зачастую и просто невозможным.

Без проведения расчетов предсказать поведение изделий (особенно малогабаритных и тонкостенных) при высоких температурах очень сложно [6–10]. Возникающие дефекты могут окончательно привести ремонтируемую деталь в негодность. Экспериментальная отработка режимов очень затратна, так как для получения оптимального результата необходимо подобрать несколько параметров процесса: закрепление детали в оснастке, режимы и траектории наплавки. Для предварительного прогнозирования дефектов и определения параметров процесса предлагается использовать численное моделирование данного процесса [11–15].

## 2 Математическая постановка

Математическая модель лазерной порошковой наплавки основана на решении уравнения теплопроводности:

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho(x)c(x)T(t,x)] = \text{div} [\lambda(x,T(t,x)) \text{grad}(T(t,x))] \quad (1)$$

Уравнения равновесия:

$$\text{div} \sigma = 0, x \in V \quad (2)$$

Физические соотношения:

$$\sigma = {}^4 C \cdot (\varepsilon - \varepsilon_T - \varepsilon_p) \quad (3)$$

Геометрические соотношения:

$$\hat{\varepsilon} = \frac{1}{2} (\nabla u + (\nabla u)^T), x \in V \quad (4)$$

Начальные условия:

$$T(x, t_0, k) = T_0(x), x \in V \quad (5)$$

Граничные условия:

$$-\lambda(x, T) \text{grad}(T) n = h(T) (T - T_c(t)), x \in S \quad (6)$$

$$u(x) = 0, x \in S_u \quad (7)$$

$$\sigma \cdot n = P, x \in S_f \quad (8)$$

## 3 Численная модель и ее верификация

Были проведены эксперименты по наплавке образцов присадочным порошком в 1 слой на высоту 20 мм. Закрепление было произведено с помощью трехкулачкового патрона. Наплавка происходила на постоянном режиме при мощности лазера 400 Вт и частоте 6000 Гц. Каждая строчка наплавлялась 17 секунд с дальнейшим перерывом в 180 секунд перед следующим слоем. Проводилось термометрирование образцов для дальнейшей верификации математической модели. Запись температур происходила на протяжении эксперимента в автоматическом режиме.

На рис. 1–2 показаны геометрические размеры образца для лазерной порошковой наплавки и результаты оцифровки внешнего диаметра цилиндрического образца после наплавки.

В зоне наплавки всех образцов наблюдается заметное уменьшение внутреннего диаметра и вертикальной составляющей (высоты) образца. Деформации внутреннего диаметра и вертикальной составляющей обратно пропорциональны толщине стенки образца – это значит, что с увеличением толщины стенки деформации и вертикальная составляющая уменьшаются. Деформации основания и места крепления с оснасткой не наблюдаются.

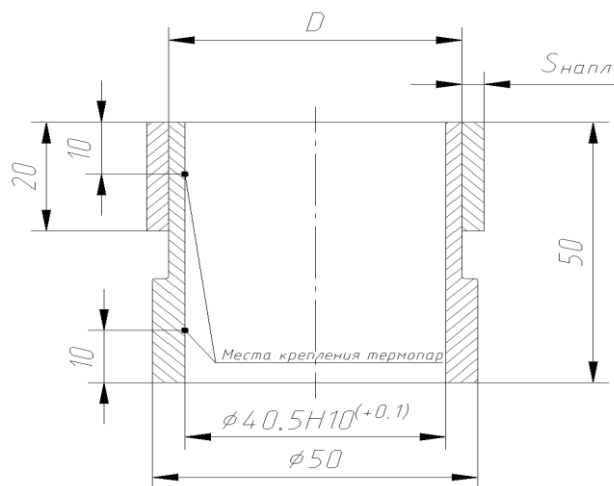


Рис. 1. Геометрические размеры образца

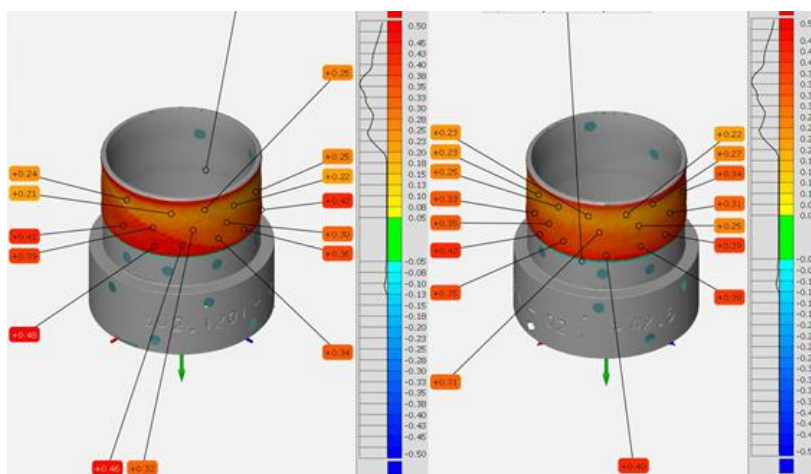


Рис. 2. Результаты оцифровки

Необходимо создать модель определения короблений во время лазерной порошковой наплавки. В расчетную область были включены следующие объекты: цилиндрический образец, наплавляемая зона, часть оснастки (кулачки патрона). Время в моделировании полностью соответствует эксперименту. Напрямую перемещающийся источник тепла не моделировался. Модель подразумевает появление элементарных тел наплавки (механизм «смерти/рождения» конечных элементов) с определенной температурой согласно режиму наплавки. Температура в таком случае должна калиброваться исходя из экспериментально полученных результатов коробления и показания термопар. В качестве модели поведения материала цилиндрического образца была принята MISO (модель, поддерживающая разупрочнение) с зависимостью от

температуры. Моделирование производилось путем разделения наплавляемой зоны на 26 строк, каждая из которых была разделена на 24 элементарных тела наплавки. На наплавку каждого тела выделялось 2.8 секунды и 2 подшага на каждом шаге: 1 подшаг составляет 0.01 секунды (прикладывается температура); 2 подшаг составляет 2,79 секунд (удаление температуры и остывание тела). После наплавки каждой строчки делался перерыв в 180 секунд перед наплавлением следующей. Перед следующей итерацией проводится смещение лазера от начального положения. Для упрощения моделирования и возможности быстро менять параметры наплавки, были написаны программные вставки со следующими функциями:

- импорт заранее заготовленного файла с настроенным временем и шагами расчета;

- назначение материалов для тел наплавки и трубчатого образца;
- управление смертью/рождением элементов;
- задание времени появления «горячего» элемента и времени его охлаждения;
- регулирование количества подшагов на этапе нагрева и охлаждения;
- импорт поля температур из тепловой задачи.

Конечно-элементная модель представлена на рис. 3. Более высокая дискретность

сетки используется в местах наплавки для более точных результатов. Кроме того, трубчатый образец был разбит на 3 слоя по диаметру для создания более качественной сетки. Для проверки адекватности алгоритма программных вставок (прикладывание температуры), необходимо убедиться в наличии градиента температуры на первом (А) и последующем (В) шагах. На рис. 4 покажем наличие температурного градиента в зоне наплавки на 1 шаге расчета.

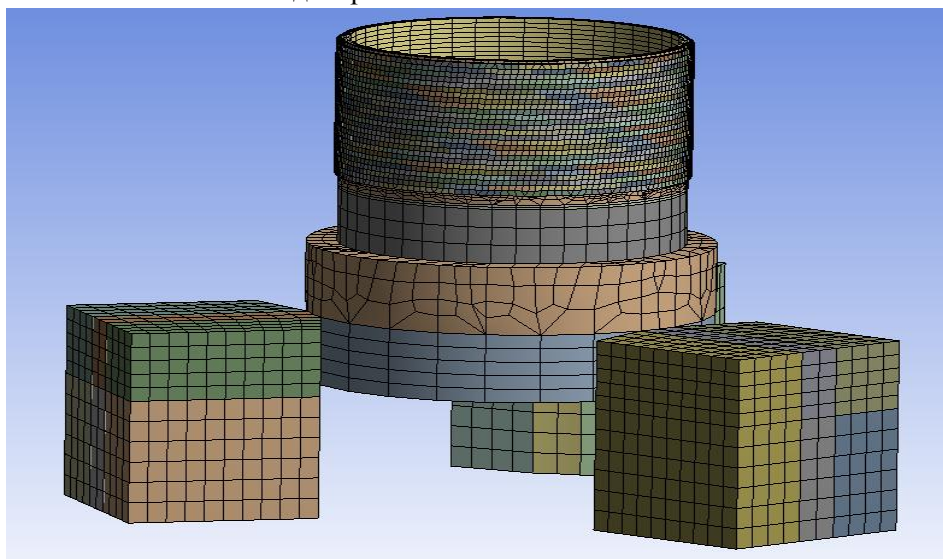


Рис. 3. Расчетная модель наплавки

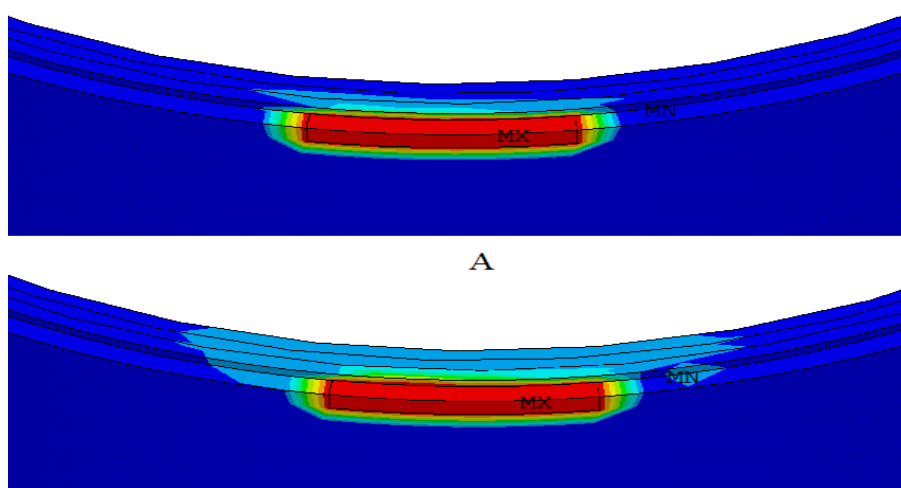


Рис. 4. Температурный градиент в зоне наплавки

Из рис. 4 можно сделать вывод о корректной работе программных вставок, так как виден физически адекватный температурный градиент.

Образцы, которые имеют более тонкую стенку, теряют устойчивость, что проявляется в виде гофры.



Рис. 5. Деформации тонкостенных образцов

Избавиться от потери устойчивости невозможно, так как при меньшей мощности лазера порошок не будет наплавляться на образец. Далее будем рассматривать образцы с удвоенной толщиной стенки.

На рис. 6 покажем сравнение результатов экспериментальной наплавки и моделирования.

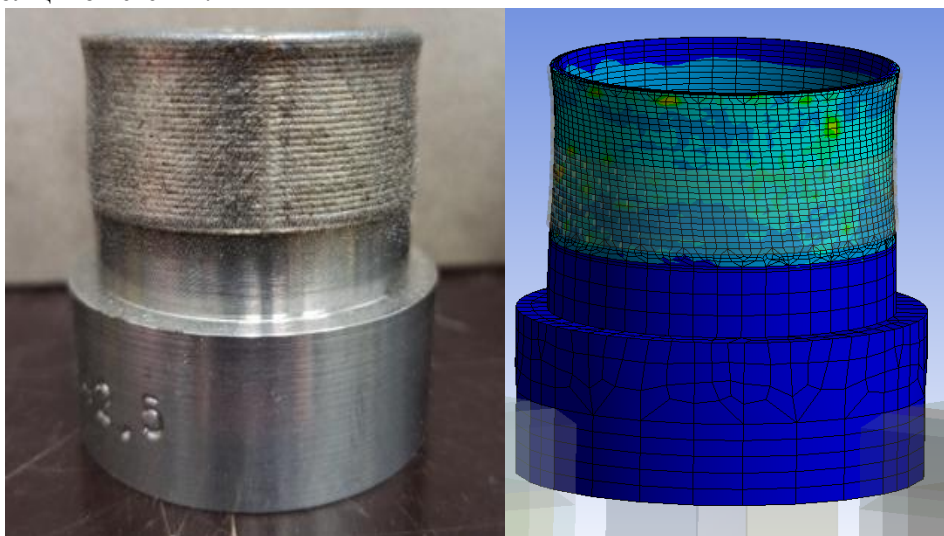


Рис. 6. Различия конечного коробления изделия при эксперименте и моделировании

На рис. 6 видно, что деформированное состояние, полученное в результате численного моделирования, несколько отличается от полученного в результате экспериментальной наплавки, однако, находится в пределах допустимого. Деформации основания совпадают.

Можно сделать вывод о необходимости дополнения упрощенной модели лазерной порошковой наплавки. Получение более точ-

ных результатов на данный момент невозможно по следующим причинам:

1. Отсутствие высокотемпературных физических свойств присадочного порошка для наплавки.

2. Отсутствие пластической модели поведения присадочного порошка для наплавки.

3. Нет возможности учитывать изменение фазовой структуры сплавов.

4. Упрощенная модель не учитывает мощность лазера, а лишь температуру луча в месте контакта со свариваемой деталью.

Для дальнейших расчетов будут получены все зависимости физических свойств и пластическая модель поведения присадочного порошка.

#### 4 Выводы

1. Были проведены эксперименты по лазерной порошковой наплавке на цилиндрических образцах.

2. Была разработана математическая модель коробления при лазерной порошковой наплавке.

3. Для упрощения моделирования были написаны программные вставки, позволяющие быстро менять параметры наплавки.

4. Анализ результатов расчетов показал необходимость дополнения математической модели, а именно: учет пластической модели поведения присадочного порошка, получение высокотемпературных физических свойств присадочного порошка.

#### Список литературы

1. O.Yu. Smetannikov, P.V. Maksimov, D.N. Trushnikov, G.L. Permyakov, V.Ya. Belenkiy, A.S. Farberov Studying of the influence of 3D wire deposition process parameters on the formation of residual deformations // PNRPU Mechanics Bulletin. – 2019. – №2. P. 181–194. (дата обращения: 11.10.2021).
2. Petrick I., Simpson T. 3D Printing disrupts manufacturing // Research-Technology Management. – November-December 2013. – P. 15–16. (дата обращения: 2.08.2021).
3. G. Li, J. Zhang, T. Shi, J Shi, D. Cheng, L. Lu, S. Shi Experimental Investigational on Laser Metal Deposition of Ti-6Al-4V Alloy with Coaxial Local Shielding Gas Nozzle // Journal of Materials Engineering and Performance. 2020. – №. 29(1–4). – С. 1–9 (дата обращения: 11.10.2021).
4. C. Li, Y. Wang, H. Zhan, T. Han, B. Han, W. Zhao Three-dimensional finite element analysis of temperatures and stresses in wide-band laser surface melting processing // Materials & Design. –2010. – Vol. 31. – No. 7. – P. 3366–3373. (дата обращения: 11.10.2021).
5. Korner C. Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting –a review // International Materials Reviews. – 2016. – Vol. 61. – No.5. – P. 361–377. (дата обращения: 12.10.2021).
6. W. King, A. Anderson, R. Ferencz, N. Hodge, C. Kamath, S. Khairallah Overview of modelling and simulation of metal powder bed fusion process at Lawrence Livermore National Laboratory // Material Science and Technology. – 2015. – Vol. 31. – No. 8. –P. 957–968. (дата обращения: 12.10.2021).
7. M. Chen, Y. Lu, Z. Wang, H. Lan, G. Sun, Z. Ni Melt pool evolution on inclined nv e690 steel plates suring laser direct metal deposition// Optic and Laser Technology. 136 (2021). (дата обращения: 15.11.2021).
8. A. Moghaddam, N. Shaburova, M. Samodurova, A. Abdollahzadeh, E. Trofimov Additive manufacturing of high entropy alloys: a practical review // Journal of Materials Science & Technology. 77 (2021). 131-162. (дата обращения: 15.11.2021).
9. Three-dimensional finite element analysis of temperatures and stresses in wide-band laser surface melting processing / C. Li, Y. Wang, H. Zhan, T. Han, B. Han, W. Zhao // Materials & De-sign. – 2010. – Vol. 31. – No. 7. – P. 3366–3373. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.01.054. (дата обращения: 2.10.2021).
10. Ma L., Bin H. Temperature and stress analysis and simulation in fractal scanning-based laser sintering // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2007. – Vol. 34. –No. 9. – P. 898–903. (дата обращения: 14.11.2021).
11. Experimental and numerical analysis of residual stresses in additive layer manufacturing by laser melting of metal powders / Ibiye A. Roberts [et al.]// Key Engineering Materials. – 2011. – Vol. 450. – P. 461–465, available at: <http://www.scientific.net/KEM.450.461>. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.450.461. (дата обращения: 14.11.2021).
12. Investigation of residual stresses in selective laser melting / L. Parry, I. Ashcroft, D. Bracket, R.D. Wildman // Key Engi-neering Materials. – 2015. – Vol. 627. – P. 129–132. (дата обращения: 5.11.2021).
13. An experimental investigation into additive manufacturing-induced residual stresses in 316L stainless steel / A. Wu, D.Brown, M. Kumar, G. Gallegos, W. King // Metall. Mater. Trans. – 2014. – Vol. 45A. – P. 1–11. (дата обращения: 11.10.2021).

14. Baufeld B., Van der Biest O., Gault R. Additive manufacturing of Ti–6Al–4V components by shaped metal deposition: Microstructure and mechanical properties // *Materials & Design*. – 2010. – Vol. 31. – P. 106–111. (дата обращения: 14.11.2021).

15. Macroscopic modelling of the selective beam melting process / D. Riedlbauer, J. Mergheim, A. McBride, P. Steinmann // *Proc. Appl. Math. Mech.* – 2012. – Vol. 12. –No. 1. – P. 381–382. (дата обращения: 14.11.2021).

### Reference

1. O.Yu. Smetannikov, P.V. Maksimov, D.N. Trushnikov, G.L. Permyakov, V.Ya. Belenkiy, A.S. Farberov Studying of the influence of 3D wire deposition process parameters on the formation of residual deformations // *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2019, №2, pp. 181-194. (date of access: 11.10.2021).

2. Petrick I., Simpson T. 3D Printing disrupts manufacturing // *Research-Technology Management*. November-December 2013, pp. 15-16. (date of access: 2.08.2021).

3. G. Li, J. Zhang, T. Shi, J Shi, D. Cheng, L. Lu, S. Shi Experimental Investigational on Laser Metal Deposition of Ti-6Al-4V Alloy with Coaxial Local Shielding Gas Nozzle // *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2020, no. 29(1–4), pp. 1-9.

4. C. Li, Y. Wang, H. Zhan, T. Han, B. Han, W. Zhao Three-dimensional finite element analysis of temperatures and stresses in wide-band laser surface melting processing // *Materials & Design*. 2010, Vol. 31, No. 7, pp. 3366–3373.

5. Korner C. Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting –a review // *International Materials Reviews*. 2016, Vol. 61, No.5, pp. 361-377.

6. W. King, A. Anderson, R. Ferencz, N. Hodge, C. Kamath, S. Khairallah Overview of modelling and simulation of metal powder bed fusion process at Lawrence Livermore National Laboratory // *Material Science and Technology*, 2015, Vol.31, No. 8, pp. 957-968.

7. M. Chen, Y. Lu, Z. Wang, H. Lan, G. Sun, Z. Ni Melt pool evolution on inclined nv e690 steel plates suring laser direct metal deposition // *Optic and Laser Technology*. 136 (2021), P. 106745.

8. A. Moghaddam, N. Shaburova, M. Samodurova, A. Abdollahzadeh, E. Trofimov Additive manufacturing of high entropy alloys: a practical review // *Journal of Materials Science & Technology*. 77 (2021), pp. 131-162.

9. Three-dimensional finite element analysis of temperatures and stresses in wide-band laser surface melting processing / C. Li, Y. Wang, H. Zhan, T. Han, B. Han, W. Zhao // *Materials & Design*. 2010, Vol. 31, No. 7, pp. 3366-3373. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.01.054. (date of access: 2.10.2021).

10. Ma L., Bin H. Temperature and stress analysis and simulation in fractal scanning-based laser sintering // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2007, Vol. 34, No. 9, pp. 898-903.

11. Experimental and numerical analysis of residual stresses in additive layer manufacturing by laser melting of metal powders / Ibiye A. Roberts [et al.]// *Key Engineering Materials*, 2011, Vol. 450, pp. 461-465, available at: <http://www.scientific.net/KEM.450.461>. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.450.461 (date of access: 14.11.2021).

12. Investigation of residual stresses in selective laser melting / L. Parry, I. Ashcroft, D. Bracket, R.D. Wildman // *Key Engineering Materials*, 2015, Vol. 627, pp. 129-132.

13. An experimental investigation into additive manufacturing-induced residual stresses in 316L stainless steel / A. Wu, D. Brown, M. Kumar, G. Gallegos, W. King // *Metall. Mater. Trans.*, 2014, Vol. 45A, pp. 1-11.

14. Baufeld B., Van der Biest O., Gault R. Additive manufacturing of Ti–6Al–4V components by shaped metal deposition: Microstructure and mechanical properties // *Materials & Design*, 2010, Vol. 31, pp. 106-111.

15. Macroscopic modelling of the selective beam melting process / D. Riedlbauer, J. Mergheim, A. McBride, P. Steinmann // *Proc. Appl. Math. Mech.*, 2012, Vol. 12, No. 1, pp. 381-382.

### Об авторах

<sup>1</sup>Донгаузер Константин Александрович, АО “ОДК-Авиадвигатель”, 614000, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 93. Начальник бюро КАТП.

<sup>2</sup>Бояршинов Михаил Геннадьевич, ФГАОУ ВО “Пермский национальный исследовательский политехнический университет”, 614990, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29. Доктор технических наук, профессор кафедры автомобилей и технологических машин

<sup>3</sup>Бекмансуров Марат Рамильевич, АО “ОДК-Авиадвигатель”, 614000, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 93. Инженер бюро КАТП. +79523303649, **bekmansurov-mr@avid.ru**.

#### About the authors

<sup>1</sup>Dongauser Konstantin Aleksandrovich, JSC “UEC-Aviadvigatel”, 93 Komsomolsky prospect, Perm, Perm Krai, 614000, Russian Federation.

<sup>2</sup>Boyarshinov Mikhail Gennadievich, Perm National Research Polytechnic University, 29 Komsomolsky prospect, Perm, Perm Krai, 614990, Russian Federation

<sup>3</sup>Bekmansurov Marat Ramil'evich, JSC “UEC-Aviadvigatel”, 93 Komsomolsky prospect, Perm, Perm Krai, 614000, Russian Federation, +79523303649, **bekmansurov-mr@avid.ru**.

Получено 24.06.2021