

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ НА КОРОБЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ПРИ РЕМОНТЕ

*Бояршинова И.Н., Бочкарев С.А.*

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

**Ключевые слова:** лазерная наплавка, параметры процесса, траектории сканирования, ремонт деталей, тонкостенные детали, моделирование в ANSYS Workbench.

**Аннотация.** Статья посвящена актуальным вопросам моделирования процессов, протекающих при изготовлении и ремонте изделий посредством лазерной порошковой наплавки. При помощи численных экспериментов решается задача определения параметров процесса лазерной наплавки, обеспечивающих уменьшение искажений геометрии элементов конструкции, подвергаемой ремонту. В качестве рассматриваемых параметров по результатам исследований были выбраны: температура нагрева пятна лазера, скорость сканирования и траектория движения лазера. При проведении численных экспериментов были определены наилучшие сочетания температурного и скоростного режимов наплавки. Предложенная авторами возвратно-поступательная траектория сканирования позволила снизить градиенты температурного поля и, как результат, уменьшить деформирование тонкостенной детали. Конечно-элементное моделирование проводилось на основании предварительных исследований с помощью метода «умерщвления» и «оживления» элементов в ANSYS Workbench.

## INFLUENCE OF LASER CLADDING PROCESS PARAMETERS ON WRAPING OF A PART DURING REPAIR

*Boyarshinova I.N., Bochkarev S.A.*

*Perm National Research Polytechnic University, Perm*

**Keywords:** laser cladding, process parameters, scanning trajectories, repair of parts, thin-walled parts, modeling in ANSYS Workbench.

**Abstract.** The article is devoted to the current issues of modeling the processes occurring during the manufacture and repair of products using laser powder cladding. Using numerical experiments, the problem of determining the parameters of the laser cladding process that reduce the distortions of the geometry of the structural elements subject to repair is solved. Based on the research results, the following parameters were selected as the parameters to be considered: the laser spot heating temperature, the scanning speed and the laser trajectory. When conducting numerical experiments, the best combinations of temperature and speed modes of cladding were determined. The reciprocating scanning trajectory proposed by the authors made it possible to reduce the gradients of the temperature field and, as a result, reduce the deformation of the thin-walled part. Finite element modeling was carried out based on preliminary studies using the method of "Death" and "Birth" elements in ANSYS Workbench.

**Введение.** В настоящее время аддитивные технологии широко внедряются и используются в машиностроении [1]. Лазерная наплавка является одной из таких технологий и позволяет, в отличие от традиционных способов, изготавливать детали высокой сложности и производить ремонт дорогостоящих деталей без изменения технологического процесса производства, снижая себестоимость и трудозатраты [2]. Процесс заключается в послойном наплавлении порошка, расплавляемого лазером, на ремонтируемую деталь или подложку при изготовлении изделия. В качестве присадочного материала используются различные порошковые смеси, выбор которых обусловлен требованиями к изготавливаемой или ремонтируемой детали.

Ремонт и изготовление деталей с помощью лазерной порошковой наплавки – сложный термомеханический процесс, моделирование которого включает целый комплекс задач [3, 4]. В список этих задач входит изучение микроструктуры и свойств получаемых деталей, определение полей остаточных напряжений, подбор параметров процесса и др. [5].

Решение подобных задач обычно производится с помощью выполнения натуральных экспериментов, требующих значительных временных и финансовых затрат. Так, например, с помощью эксперимента в статье [6] была определена зависимость высоты наплавляемого слоя и его пористости от параметров процесса: скорости сканирования, мощности лазера и количества подаваемого порошка. Авторами работы [7] была определена скорость сканирования для наилучшего формирования слоев наплавки и повышения производительности процесса.

Еще одним способом решения имеющихся в области лазерной наплавки задач является математическое и компьютерное моделирование процесса, что позволяет снизить затраты и проверить эффективность используемых параметров еще на этапе проектирования. Авторами в работе [8] с помощью численного эксперимента было исследовано влияние параметров процесса лазерной наплавки (формы вытачиваемых канавок, траектории наплавки) на напряженно-деформированное состояние (НДС) детали при ремонте трещины. В статье [9] описывается моделирование процесса лазерной наплавки с помощью метода «рождения» и «смерти» элементов.

**Постановка задачи.** При восстановлении с помощью лазерной наплавки посадочного диаметра корпуса, схема которого представлена на рисунке 1, было выявлено коробление тонкой стенки детали. Требуется исследовать влияние параметров процесса лазерной наплавки на деформирование детали и выбрать параметры, которые позволят уменьшить коробление.

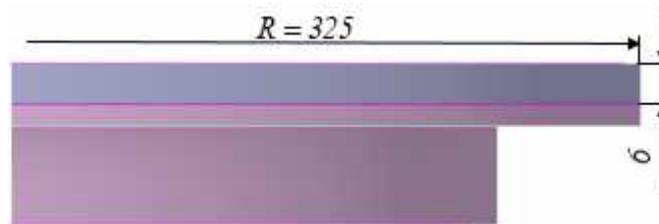


Рис. 1. Модель корпуса

Решение задачи состоит из двух этапов: сначала формулируется и решается краевая задача теплопроводности, а затем решается задача определения НДС.

Задача определения температурных полей является краевой нестационарной задачей теплопроводности и включает:

– уравнение теплопроводности:

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

где  $c(\mathbf{x},T)$  – теплоемкость,  $\lambda(\mathbf{x},T)$  – теплопроводность,  $\rho(\mathbf{x})$  – плотность,

– граничные условия:

$$-\lambda(\mathbf{x},T)\text{grad}(T) \cdot \mathbf{n} = h(T) \cdot (T - T_c(t)) + \varepsilon\sigma_0(T)^4, \quad \mathbf{x} \in S_k, \quad (2)$$

где первое слагаемое правой части описывает конвективный теплоперенос, а второе – излучение;  $\varepsilon$  – коэффициент черноты;  $\sigma_0$  – постоянная Стефана-Больцмана;  $h(T)$  – коэффициент теплопередачи;  $T_c(t)$  – температура окружающей среды;  $\mathbf{n}$  – внешняя единичная нормаль к границе  $S$  охлаждаемого тела;

– начальные условия:

$$T(\mathbf{x},t_{0,k}) = T_{k-1}(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in V_k, \quad (3)$$

где  $T(\mathbf{x},t_{0,k})$  – начальное распределение температуры для  $k$ -го этапа;  $T_{k-1}(\mathbf{x})$  – температура на предыдущем этапе.

Деление задачи на этапы связано с технологией поэтапного «умерщвления» и «оживления» элементов в программном пакете ANSYS.

Несвязная квазистатическая задача механики деформируемого твердого тела с учетом несущественности вклада массовых сил на  $k$ -м этапе включает:

– уравнения равновесия:

$$\operatorname{div} \boldsymbol{\sigma} = 0, \quad \mathbf{x} \in V_k, \quad (4)$$

где  $\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}, t)$  – тензор напряжений;

– геометрические соотношения Коши:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{u} + \mathbf{u} \nabla), \quad \mathbf{x} \in V_k, \quad (5)$$

где  $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$  – вектор перемещений;  $\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{x}, t)$  – тензор полных деформаций;

– граничные условия в перемещениях:

$$\mathbf{u} = \mathbf{U}, \quad \mathbf{x} \in S_{u,k}, \quad (6)$$

– граничные условия в напряжениях:

$$\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} = 0, \quad \mathbf{x} \in S_{\sigma,k}, \quad (7)$$

где  $S_u, S_\sigma$  – части границы с заданными перемещениями и нагрузками.

Для описания упругопластического поведения материала, из которого изготовлены детали, использована модель пластичности с мультилинейным изотропным упрочнением (MISO). На рисунке 2 представлен график поведения материала в координатах «эквивалентные напряжения – эквивалентные деформации».

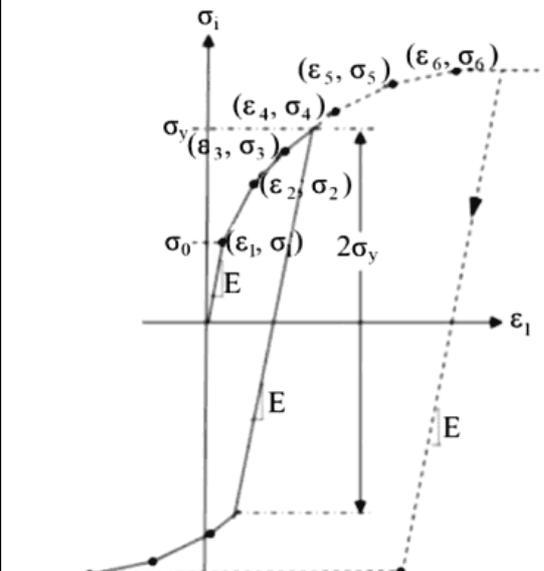


Рис. 2. Диаграмма  $\sigma - \varepsilon$  для мультилинейной изотропной модели MISO

**Методика решения и результаты.** На основании исследований, представленных в работе [10], моделирование процесса восстановления посадочных диаметров корпуса проводилось при температуре нагрева, равной  $1700^\circ\text{C}$ , обеспечивающей плавление порошка, и скорости движения лазера –  $2 \text{ мм/с}$ , не приводящей к прогоранию стенки детали.

Традиционно при лазерной наплавке используется однонаправленное сканирование. Для снижения температурных градиентов на основании предварительных исследований авторами предложено использовать возвратно-поступательную траекторию. На рисунке 3 представлены схемы движения лазера при однонаправленном сканировании и возвратно-поступательной траектории. Красный цвет – лазер включен, черный цвет – лазер выключен.

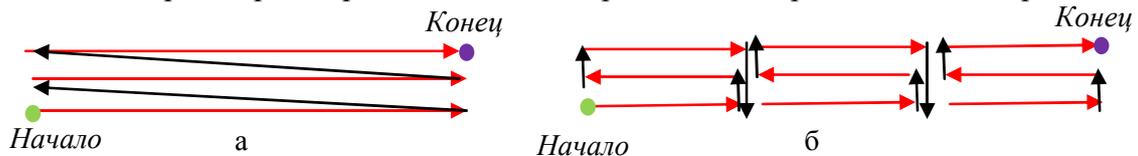


Рис. 3. Используемые траектории: а) однонаправленное сканирование, б) возвратно-поступательная траектория

На рисунке 4 представлены поля перемещений при рассматриваемых траекториях сканирования.

Для анализа перемещений был произведен расчет перемещений корпуса по четырем контрольным линиям, расположенным на концах двух взаимно перпендикулярных диаметров. На рисунке 5 представлены графики перемещений вдоль контрольных линий при рассматриваемых траекториях.

Перемещения детали по линиям контроля при использовании однонаправленного сканирования в два раза больше перемещений, полученных при возвратно-поступательной траектории.

Для более точного сравнения перемещений в детали рассмотрим деформирование внутреннего и внешнего диаметров корпуса. Графики перемещений на внутреннем и внешнем диаметре для двух рассматриваемых траекторий представлены на рисунке 6.

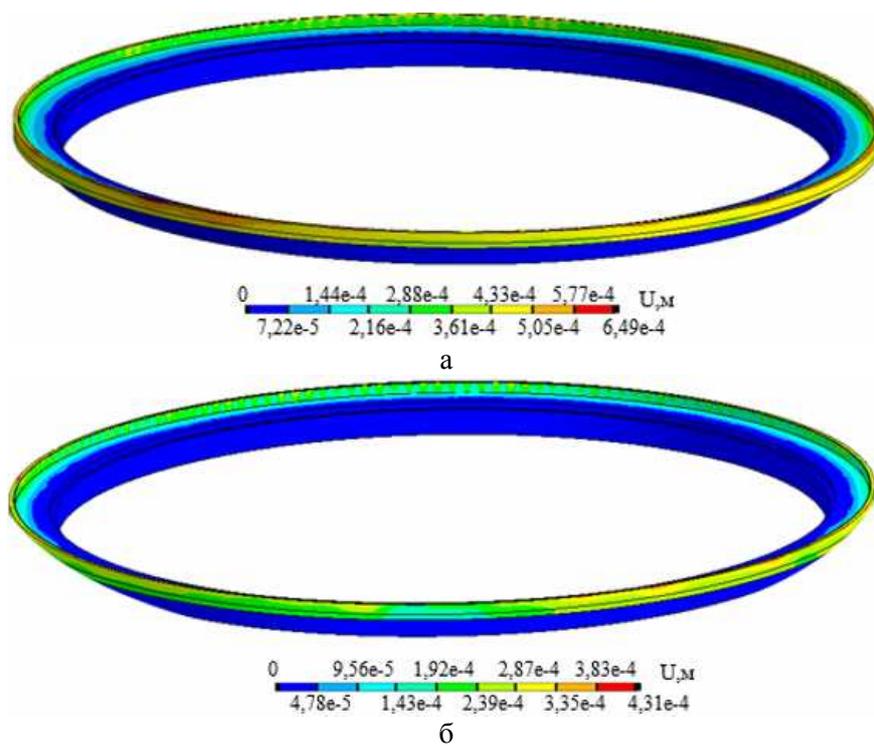


Рис. 4. Поля перемещений при: а) однонаправленном сканировании,  $U_{\max} = 6,49e-4$  м, б) возвратно-поступательной траектории,  $U_{\max} = 4,31e-4$  м

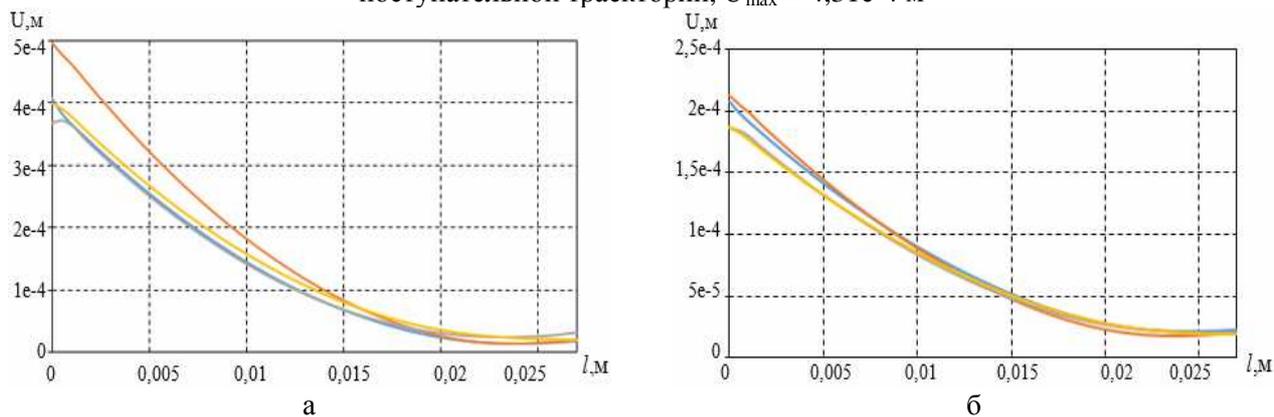


Рис. 5. Графики перемещений по линиям при: а) однонаправленном сканировании; б) возвратно-поступательной траектории

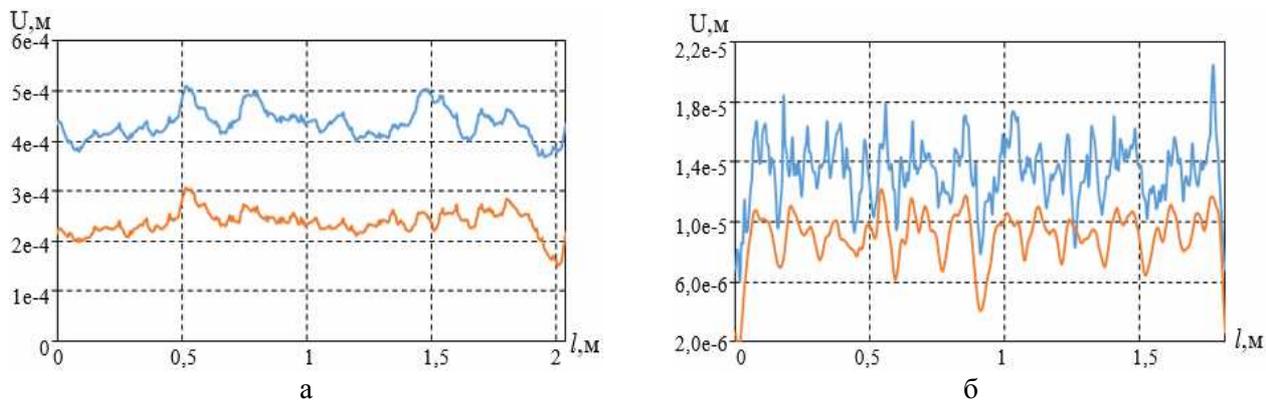


Рис. 6. Графики перемещений на внешнем (а) и внутреннем (б) диаметрах: синий график – однонаправленное сканирование, оранжевый график – возвратно-поступательная траектория

Перемещения при использовании возвратно-поступательной траектории в среднем в два раза ниже, чем при использовании однонаправленного сканирования.

## Выводы

При рассмотрении процесса восстановления посадочного диаметра корпуса посредством технологии лазерной наплавки с помощью численного моделирования сравнивались перемещения, возникающие в детали при двух вариантах траекторий движения лазера: традиционной и предложенной авторами возвратно-поступательной. Температура нагрева и скорость движения лазера выбраны в предварительных численных экспериментах. Значения перемещений на внутренней поверхности, внешнем и внутреннем диаметрах детали при использовании возвратно-поступательной траектории в два раза меньше, чем при традиционном однонаправленном сканировании.

## Список литературы

1. Зорин В.А., Полухин Е.В. Аддитивные технологии // СТТ: Строительная техника и технологии. – 2016. – № 3(119). – С. 54-57.
2. Корсмик Р.С., Туричин Г.А., Климова-Корсмик О.Г., Земляков Е.В., Бабкин К.Д. Лазерная порошковая восстановительная наплавка лопаток газотурбинного двигателя // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2016. – Т. 15, № 3. – С. 60-69.
3. Сметанников О.Ю., Трушников Д.Н., Максимов П.В., Бартоломей М.Л., Ковязин А.В. Моделирование в ANSYS термомеханического поведения изделия в процессе 3D-наплавки проволочных материалов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2017. – № 4. – С. 154-172.
4. Бояршинова И.Н., Бочкарев С.А. Моделирование процесса устранения трещины с помощью лазерной наплавки // Научно-технический вестник Поволжья. – 2022. – № 8. – С. 7-10.
5. Нарва В.К., Маранц А.В., Сентюрин Ж.А. Термическая обработка композиционных материалов Сталь-TiC, полученных методом лазерной наплавки // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2013. – №4. – С. 3-7.
6. Морозов Е.А. Исследование покрытия из легированной стали, полученного лазерной наплавкой // Металлообработка. – 2015. – №3(87). – С. 32-34.
7. Климова-Корсмик О.Г., Дроконов Д.А., Промахов В.В., Корсмик Р.С., Жуков А.С., Шульц Н.А., Клименко В.А. Влияние технологических параметров лазерной наплавки азотированного никель-хромового сплава марки ПР-N55X45A на формирование структуры получаемых слоев // Технологии аддитивного производства. – 2019. – Т. 1, № 2. – С. 5-19.
8. Бояршинова И.Н., Бочкарев С.А. Численное исследование процесса лазерной наплавки при устранении трещин // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 8. – С. 15-18.
9. Бояршинов М.Г., Донгаузер К.А., Бекмансуров М.Р. Численное моделирование деформаций в аддитивном технологическом процессе лазерной порошковой наплавки // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2022. – № 68. – С. 30-37.
10. Бояршинова И.Н., Бочкарев С.А. Численное исследование влияния параметров процесса лазерной наплавки на деформирование деталей // Научно-технический вестник Поволжья. – 2024. – № 7. – С. 33-36.

## References

1. Zorin V.A., Polukhin E.V. Additive technologies // CET: Construction equipment and technologies. 2016, no. 3(119), pp. 54-57.
2. Korsmik R.S., Turichin G.A., Klimova-Korsmik O.G., Zemlyakov E.V., Babkin K.D. Laser powder restorative surfacing of gas turbine engine blades // Bulletin of Samara University. Aerospace engineering, technology and mechanical engineering. 2016, vol. 15, no. 3, pp. 60-69.
3. Smetannikov O.Yu., Trushnikov D.N., Maksimov P.V., Bartolomei M.L., Kovyazin A.V. Modeling in ANSYS of thermomechanical behavior of a product during 3D surfacing of wire materials // Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanics. 2017, no. 4, pp. 154-1724.
4. Boyarshinova I.N., Bochkarev S.A. Modeling the process of crack elimination using laser cladding // Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region. 2022, no. 8, pp. 7-10.
5. Narva V.K., Marantz A.V., Sentyurina Zh.A. Heat treatment of composite materials Steel-TiC obtained by laser surfacing // News of higher educational institutions. Powder metallurgy and functional coatings. 2013, no. 4, pp. 3-7.
6. Morozov Evgeny Aleksandrovich Study of coating of alloy steel obtained by laser surfacing // Metalworking. 2015, no. 3(87), pp. 32-34.
7. Klimova-Korsmik O.G., Drokonov D.A., Promakhov V.V., Korsmik R.S., Zhukov A.S., Shults N.A., Klimenko V.A. Influence of technological parameters of laser cladding of nitrided nickel-chromium alloy grade PR-N55X45A on the formation of the structure of the resulting layers // Additive manufacturing technologies. 2019, vol. 1, no. 2, pp. 5-19.
8. Boyarshinova I.N., Bochkarev S.A. Numerical study of the laser cladding process in eliminating cracks // Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region. 2023, no. 8, pp. 15-18.

9. Boyarshinov M.G., Dongauser K.A., Bekmansurov M.R. Numerical modeling of deformations in the additive technological process of laser powder cladding // Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Aerospace engineering. 2022, no. 68, pp. 30-37.
10. Boyarshinova I.N., Bochkarev S.A. Numerical study of the influence of laser cladding process parameters on the deformation of parts // Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region. 2024, no. 7, pp. 33-36.

*Сведения об авторах:*

*Information about authors:*

<b>Бояршинова Ирина Николаевна</b> – кандидат технических наук, доцент кафедры «Вычислительная математика, механика и биомеханика»	<b>Boyarshinova Irina Nikolaevna</b> – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of computational mathematics, mechanics and biomechanics
<b>Бочкарев Сергей Андреевич</b> – магистр itkbxrf@gmail.com	<b>Bochkarev Sergey Andreevich</b> – master

*Получена 20.06.2024*