Сметанников О.Ю., Бекмансуров М.Р., Ильиных Г.В., Донгаузер К.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния в процессе лазерной порошковой наплавки с целью определения конечного коробления изделий // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2023. – № 6. С. 124–134. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.6.12

Smetannikov O.Yu., Bekmansurov M.R., Ilinykh G.V., Dongauzer K.A. Simulating the stress-strain state during laser metal deposition to determine the final warping of products. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2023, no. 6, pp. 124-134. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.6.12

пермский политех

ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА
№ 6, 2023
PNRPU MECHANICS BULLETIN
https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2023.6.12
УДК 539.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В ПРОЦЕССЕ ЛАЗЕРНОЙ ПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКИ С ЦЕЛЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЕЧНОГО КОРОБЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ

О.Ю. Сметанников[1], М.Р. Бекмансуров[1,2], Г.В. Ильиных[1], К.А. Донгаузер[2]

[1]Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация
[2]ОДК-Авиадвигатель, Пермь, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 20 марта 2023 г.
Одобрена: 04 сентября 2023 г.
Принята к публикации: 31 ноября 2023 г.

Ключевые слова:

аддитивные технологии, аддитивное производство, лазерная порошковая наплавка, присадочный порошок, моделирование напряженно-деформированного состояния, ремонтные технологии, связанная задача, смерть/рождение элементов, коробления, задача нестационарной теплопроводности, квазистатическая задача.

АННОТАЦИЯ

Аддитивные технологии, частью которых является лазерная порошковая наплавка (ремонтная технология), позволяют создавать изделия за счет последовательного наплавления слоев порошка. Такой процесс предполагает большие температурные градиенты и технологические остаточные напряжения, которые могут приводить к нарушению формы, изменению механических и эксплуатационных характеристик изделия. Для контроля и предотвращения появления остаточных деформаций в теле наплавки имеет смысл проводить конечно-элементное моделирование процесса лазерной порошковой наплавки при помощи технологии послойной активации или добавления новых конечных элементов на поверхности наплавляемой модели. Наиболее подходящим для решения задачи будет метод рождения/смерти элементов (Element Birth/Death), в котором элементы для еще не созданного материала деактивируются (и, таким образом, не включаются в область решения), а затем постепенно возрождаются и включаются в область решения. Наращивание материала производится дискретно. На каждом подэтапе расчёта, соответствующем «оживлению» очередной подобласти из «мертвых» элементов, решается связанная задача теплопроводности и механики деформированного твёрдого тела, причём результат решения предыдущего подэтапа служит начальными условиями для последующего. Разработана математическая модель и алгоритм моделирования коробления при наплавке, проведены расчеты наплавки цилиндрических образцов. В ходе расчетов была использована полилинейная модель пластичности MISO для материала образца и билинейная модель пластичности BISO для присадочного порошка. Проведена верификация модели по результатам оптического контроля изменения геометрии экспериментальных образцов после реальной наплавки. Погрешность расчета коробления не превысила 5 %.

© ПНИПУ

© **Сметанников Олег Юрьевич** – д.т.н., проф., e-mail: sou2009@mail.ru, ID: 0000-0003-3100-7283.
Бекмансуров Марат Рамильевич – асп., инж., e-mail: bekmansurov@list.ru, ID: 0009-0009-0958-646X.
Ильиных Глеб Валентинович – асп., ст. преп., e-mail: gleb@ilinyh.ru, ID: 0009-0006-4715-3700.
Донгаузер Константин Александрович – нач. бюро, e-mail: dongauser@avid.ru, ID: 0009-0008-6190-195X.

Oleg Yu. Smetannikov – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: sou2009@mail.ru, ID: 0000-0003-3100-7283.
Marat R. Bekmansurov – PhD Student, Engineer, e-mail: bekmansurov@list.ru, ID: 0009-0009-0958-646X.
Gleb V. Ilinyh – PhD Student, Senior Lecturer, e-mail: gleb@ilinyh.ru, ID: 0009-0006-4715-3700.
Konstantin A. Dongauser – Head of Simulation Department, e-mail: dongauser@avid.ru, ID: 0009-0008-6190-195X.

Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

SIMULATING THE STRESS-STRAIN STATE DURING LASER METAL DEPOSITION TO DETERMINE THE FINAL WARPING OF PRODUCTS

O.Yu. Smetannikov[1], M.R. Bekmansurov[1,2], G.V. Ilinykh[1], K.A. Dongauzer[2]

[1]Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation
[2]UEC-Aviadvigatel, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 20 March 2023
Approved: 04 September 2023
Accepted for publication:
31 November 2023

Keywords:

additive technologies, additive manufacturing, laser metal deposition, filler powder, stress-strain state modeling, repair technologies, related problem, death/birth of elements, warping, problem of non-stationary heat conduction, quasi-static problem.

ABSTRACT

Additive technologies, including laser powder deposition (a repair technology), enable a sequential deposition of powder layers. This process involves large temperature gradients and technological residual stresses, which can lead to shape violations and change mechanical and operational characteristics of products. To control and prevent residual deformations in the hardfacing body, it makes sense to carry out finite element modeling of the laser powder hardfacing using layer-by-layer activation technology or adding new finite elements to the surface of the hardfacing model. The Element Birth/Death method is the most suitable method for this problem. In this case the elements for the material to be created are deactivated (so not included in the solution area), and then gradually revived and included in the solution area. The material is built up discretely. At each sub-stage of the calculation, corresponding to the *revival* of the next sub-domain of *dead* elements, the coupled problem of thermal conductivity and solid mechanics is solved, and thus the result of the solution of the previous sub-stage serves as the initial conditions for the next one. A mathematical model and an algorithm for modeling warping during the deposition are developed, and calculations for the deposition of cylindrical specimens are carried out. During the calculations, the multilinear MISO plasticity model for the sample material and the BISO bilinear plasticity model for the filler powder were used. We verified the model based on the optical control results of changes in the geometry of the experimental samples after the deposition had been carried out. The error in warpage calculation did not exceed 5%.

© PNRPU

1. Подход к моделированию

Процесс лазерной порошковой наплавки заключается в постепенном нанесении тонких слоёв нагретого материала на поверхность детали. Такой процесс предполагает большие температурные градиенты и технологические остаточные напряжения, которые могут приводить к нарушению формы изделия, изменению механических и эксплуатационных характеристик объекта [1–21].

Существуют разные варианты моделирования процесса лазерной порошковой наплавки методом конечных элементов [22], в том числе метод, отображающий локальное поле остаточных напряжений, вычисленное на мезомасштабном уровне [23], метод собственных деформаций (inherent-strain method) [24], построение аналитических выражений деформационного параметра для оценки максимальных остаточных деформаций [25; 26] и др. Однако для моделирования порошковой наплавки на изделия сложной произвольной формы основным подходом (в рамках МКЭ) является технология послойной активации или добавления новых конечных элементов на поверхности наплавляемой модели.

Применяются три наиболее часто используемых метода моделирования осаждения материала – так называемый рождающийся элемент (element birth), спящий элемент (quiet element) и гибридная активация (hybrid activation) [27; 28]. В методе рождающегося элемента элементы для еще не созданного материала деактивируются (и, таким образом, не включаются в область решения), а затем постепенно возрождаются и включаются в область решения. В методе спящих элементов все элементы присутствуют в расчетной модели с самого начала и имеют искусственные свойства с очень малой жесткостью. По мере наращивания детали свойства этих элементов поэтапно переключаются на реальные физические свойства. Наконец, гибридный метод активации сочетает в себе методы рождающихся и спящих элементов, где активируется только текущий слой осаждения и устанавливается в спящее состояние, а все последующие слои деактивируются [29]. В расчетной программе используется технология «смерти» и последующего «оживления» (Elements Birth and Death) элементов [30; 31]. При этом в качестве расчётной рассматривается область, занимаемая уже готовым изделием. Наращивание материала производится дискретно. На каждом подэтапе расчёта, соответствующем «оживлению» очередной подобласти из «мертвых» элементов, решается краевая задача теплопроводности и механики деформированного твёрдого тела, причём результат решения предыдущего подэтапа служит начальными условиями для последующего.

Существует два подхода к решению этих краевых задач. Первый подход – решение связанной задачи в нестационарном режиме, который заключается в использовании конечных элементов, имеющих в качестве степеней свободы как температуру, так и перемещения. Однако такой подход содержит в себе определенные недостатки, в том числе неустойчивость решения и большие требования к вычислительным ресурсам. Другим подходом

является анализ теплопроводности в нестационарном режиме с последующим анализом упругопластических деформаций [32]. Другими словами, сначала численно решается задача нестационарной теплопроводности, затем температурное поле импортируется в термомеханическую модель в качестве нагрузки для расчёта напряжений и деформаций. Для обеспечения большей эффективности вычислений используется принцип, при котором одновременно активируются несколько групп элементов, соответствующих последовательности нескольких подэтапов [33; 34].

Другим вопросом является степень детализации и дискретизации модели наплавки, а также возможность оперативного изменения этих параметров. Возможны различные парадигмы создания модели наплавки. Одним из вариантов является привязка геометрических объектов к подэтапам оживления элементов. В таком подходе к симуляции процесса наплавки пользователь должен вручную или полуавтоматическим способом создать совокупность геометрических объёмов наплавляемого материала и их нумерацию для последовательной активации. При этом геометрическая модель зависит от активируемых объёмов и, соответственно, от траекторий наплавки, а конечно-элементная сетка, в свою очередь, зависит от геометрии. Данная зависимость представлена на рис. 1.

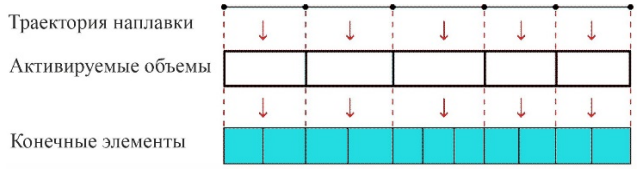


Рис. 1. Схема построения модели наплавки от траекторий

Fig. 1. Scheme for constructing a deposition model from trajectories

Такая схема имеет недостатки. Характерные размеры детали на два и более порядка больше ширины наплавляемых дорожек, следовательно, для совместности геометрии потребуется выполнение множества булевых операций с высокой разницей между размерами объектов. Также это накладывает множество ограничений как на построение конечно-элементной сетки детали, так и на построение сетки слоёв наплавки. Частичным решением данной проблемы может быть использование контактных элементов «bonded» между деталью и слоем наплавки. Большое количество дополнительных геометрических объектов требует дополнительного времени на операции настройки генерации сеток. Размер геометрического объёма ограничивает максимальный размер его конечных элементов. В таком случае усложняется процесс отладки модели на грубой сетке. Также при изменении траекторий наплавки необходимо перестроить геометрию и сетку.

Исходя из вышеописанного, предложен другой подход создания модели. В данном подходе прямая связь между траекториями наплавки, активируемыми объёмами и конечно-элементной сеткой отсутствует (см. рис. 2).

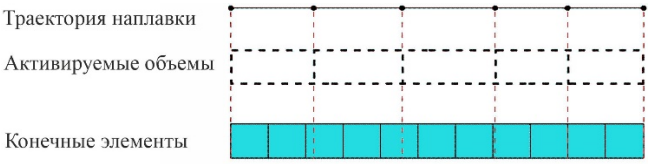


Рис. 2. Схема построения модели наплавки

Fig. 2. Scheme of building a surfacing model

В таком случае выбор элементов для активации происходит не по номерам, а по координатам точек траекторий наплавки. Для этого создаётся локальная система координат в первой точке траектории с осью по направлению ко второй точке траектории. Элементы выбираются в этой системе координат с указанием окрестности наплавки (можно указать равной диаметру пятна наплавки). Минимальным объёмом для активации является набор элементов вдоль одного отрезка траектории. Однако ввиду того, что нет связи траектории с геометрией и сеткой, перед расчётом любой отрезок траектории можно разделить на любое количество частей, указав в качестве параметра максимальную длину отрезка траектории. Таким образом, здесь и далее под активируемым объёмом будет подразумеваться набор элементов вдоль траектории, а не геометрический объём. Изменение дискретизации в таком случае не требует изменения геометрии. Преимуществами данного подхода являются: возможность генерации высококачественных структурированных сеток и гибкая система изменения активируемого объёма элементов без необходимости перестройки геометрии и сетки.

2. Математическая модель

В соответствии с алгоритмом решения задачи, постановка краевой задачи нестационарной теплопроводности по определению полей температур учётом принятых гипотез включает в себя:

1) уравнение теплопроводности:

$$\rho(\mathbf{x})\frac{\partial H}{\partial T}\frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}\left(\lambda(\mathbf{x},T)\operatorname{grad}(T)\right), \quad \mathbf{x}\in V_k, \qquad (1)$$

где H – энтальпия (функция температуры), которая включает в себя эффекты от удельной теплоемкости и скрытой теплоты кристаллизации; $\rho(\mathbf{x})$, $\lambda(\mathbf{x},T)$ – плотность и теплопроводность материала; $V_k = V_k^{old} + V_k^{new}$ – расчетный объем, состоящий из V_k^{old} – объема конструкции с наплавленным материалом и V_k^{new} – объема, наплавляемого на текущем шаге.

$$H(T)=\int_0^T c_p(T)dT+L\left[1-f_s(T)\right], \quad (2)$$

где $c_p(T)$ – теплоемкость материала; L – скрытая теплота кристаллизации; $f_s(T)$ – коэффициент содержания твердой фракции. Учёт выделения тепла в процессе кристаллизации производится путем скачкообразного уменьшения теплоемкости на интервале кристаллизации (затвердевания).

2) граничные условия:

$$\begin{aligned}-\lambda(\mathbf{x},T)\,\mathrm{grad}(T)\cdot\mathbf{n}=\\ =h\cdot(T-T_c)+\varepsilon\sigma_0\left(T^4-T_C^4\right),\ \mathbf{x}\in S_k,\end{aligned} \quad (3)$$

где $h\cdot(T-T_c)$ – конвективный перенос тепла; $\varepsilon\sigma_0\left(T^4-T_C^4\right)$ – тепловое излучение (закон Стефана – Больцмана); ε – коэффициент черноты; σ_0 – постоянная Стефана – Больцмана; h – коэффициент теплоотдачи; T_c – температура окружающей среды.

3) начальные условия:

$$T\left(\mathbf{x},t_{0,k}\right)=T_{k-1}(\mathbf{x}),\ \mathbf{x}\in V_k, \quad (4)$$

где $T(\mathbf{x},t)$ – начальное распределение температуры для k-го подэтапа; $T_{k-1}(\mathbf{x})$ – температура, определенная на конец предыдущего шага.

Несвязанная квазистатическая краевая задача МДТТ с учётом несущественности вклада массовых сил на включает:

1) уравнения равновесия:

$$\mathrm{div}\hat{\sigma}=0,\ \mathbf{x}\in V_k, \quad (5)$$

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

2) геометрические соотношения Коши:

$$\hat{\varepsilon}=\frac{1}{2}\left(\nabla\mathbf{u}+(\nabla\mathbf{u})^T\right),\ \mathbf{x}\in V_k, \quad (6)$$

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

3) физические соотношения

$$\hat{\sigma}={}^4C\cdot\cdot\left(\hat{\varepsilon}-\hat{\varepsilon}_T-\hat{\varepsilon}_p\right),\ x\in V_k, \quad (7)$$

где $\hat{\varepsilon}_p(\mathbf{x},t)$ – тензор пластических деформаций; $\hat{\varepsilon}_T(\mathbf{x},t)$ – тензор температурных деформаций;

4) граничные условия в перемещениях:

$$\mathbf{u}(\mathbf{x},t)=0,\ \mathbf{x}\in S_u, \quad (8)$$

и напряжениях:

$$\hat{\sigma}\cdot\mathbf{n}=P,\ \mathbf{x}\in S_\sigma, \quad (9)$$

где S_u, S_σ – части границы с заданными перемещениями и нагрузками соответственно. В рассматриваемой задаче P=0. Граничному условию (9) удовлетворяют все свободные границы S_σ.

Общая система уравнений краевой задачи МДТТ включает также определяющие соотношения. Для описания упругопластического поведения наплавляемого порошка использована модель пластичности с билинейным изотропным упрочнением (BISO) и температурной зависимостью параметров. Поведение материала в координатах «эквивалентные напряжения – эквивалентные деформации» показано на рис. 3.

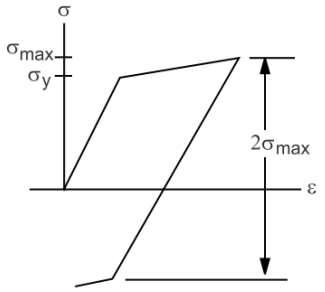


Рис. 3. Диаграмма σ – ε для билинейной изотропной модели BISO

Fig. 3. σ – ε diagram for bilinear isotropic BISO model

Модель имеет следующий вид:

$$\hat{\varepsilon}=\hat{\varepsilon}_e+\hat{\varepsilon}_p+\hat{\varepsilon}_T, \quad (10)$$

$$\hat{\varepsilon}_T(\mathbf{x},t)=\hat{E}\int_{T_0}^{T}\alpha\left(\mathbf{x},T(\mathbf{x},t)\right)dT, \quad (11)$$

где $\alpha(\mathbf{x},T)$ – коэффициент температурного расширения материала; T_0 – температура начала отсчёта температурной деформации; $\hat{E}$ – единичный тензор второго ранга.

В случае, когда $\sigma_e\geq\sigma_y$, материал подвергается пластическому деформированию. При численной реализации модели BISO используется критерий пластичности Мизеса (12) и ассоциированный закон течения, в качестве меры упрочнения выбирается работа пластической деформации. Закон упрочнения определяется соотношением (13).

$$\sigma_i=\sqrt{\frac{3}{2}\hat{s}:\hat{s}}, \quad (12)$$

где $\hat{s}(\mathbf{x},t)=\hat{\sigma}(\mathbf{x},t)-\sigma(\mathbf{x},t)\hat{E}$ – девиатор тензора напряжений;

$$F=\sqrt{\frac{3}{2}\hat{s}:\hat{s}}-\sigma_k, \quad (13)$$

где σ_k – функция количества работы при пластическом деформировании. Для модели BISO σ_k определяется напрямую из эквивалентных пластических деформаций и заданной диаграммы деформирования (см. рис. 3).

Задача с учётом пластичности решается с использованием итерационной пошаговой процедуры в терминах приращений деформаций и напряжений. Пластическое деформирование описывается ассоциированным законом течения:

$$d\hat{\varepsilon}_p = \lambda \frac{\partial Q}{\partial \hat{\sigma}}, \qquad (14)$$

1где $d\hat{\varepsilon}_p$ – приращение тензора пластических деформаций; λ – пластический множитель (множитель Лагранжа), при численной реализации модели BISO определяется в итерационной процедуре Ньютона – Рафсона; Q – пластический потенциал, в качестве которого используется уже определенная функция текучести F.

Для описания упругопластического поведения сплава, из которого изготовлены цилиндрические образцы, использована схожая с моделью BISO модель пластичности с мультилинейным изотропным упрочнением (MISO) и температурной зависимостью параметров. Поведение материала в координатах «эквивалентные напряжения – эквивалентные деформации» показано на рис. 4.

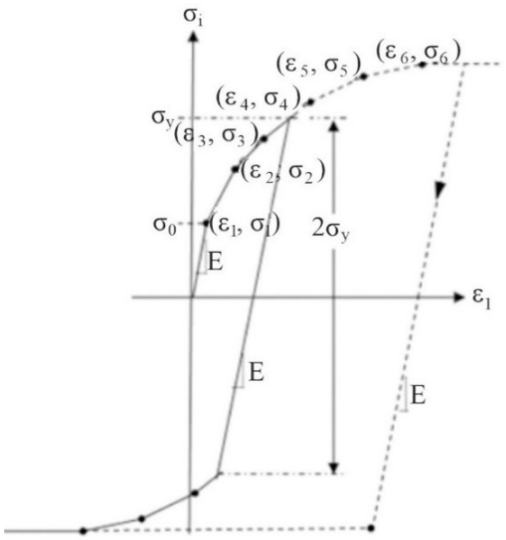


Рис. 4. Диаграмма σ – ε для мультилинейной изотропной модели MISO

Fig. 4. σ – ε diagram for multilinear isotropic MISO model

Приращение напряжений при пошаговой процедуре расчёта НДС вычисляется по формуле:

$$d\hat{\sigma} = {}^4\hat{C} \cdot\cdot d\hat{\varepsilon}_e. \qquad (15)$$

С учётом особенностей поведения элементов, «оживляемых» по технологии, используемой в расчетном пакете, соотношения (7) преобразуются к виду

$$\hat{\sigma} = {}^4\hat{C} \cdot\cdot \left(\hat{\varepsilon} - \hat{\varepsilon}_T - \hat{\varepsilon}_p - \hat{\varepsilon}_{k-1}\right), \qquad (16)$$

где $\hat{\varepsilon}_{k-1}$ – полная деформация, вычисленная к концу k – 1-го подэтапа.

3. Решение нестационарной тепловой задачи с перемещающимся источником тепла

Согласно методике решения задачи, на первом шаге из расчета исключены все конечные элементы (Element Death). Затем происходит поэтапное оживление элементов в соответствии с траекториями перемещающегося источника тепла и режимом наплавки (Element Birth). При оживлении каждый элемент обладает температурой T^*, которая удаляется через промежуток времени, соответствующий технологическому режиму наплавки, имитируя воздействие лазера. После удаления температуры происходит распределение температурного поля в наплавляемом теле и отдача тепла в среду за счет свободной конвекции. После прохождения каждой траектории происходит дополнительная пауза, которая служит для свободного остывания наплавленных тел. Далее температурное поле, полученное в результате решения задачи нестационарной теплопроводности, импортируется в механическую задачу в качестве нагрузки.

В расчёте нестационарной тепловой задачи решались уравнения (1)–(4). Для всех задач использован температурный элемент SOLID279, использующий температуры в качестве узловых неизвестных.

Для верификации температурной задачи получены данные экспериментальных показаний с термопар, установленных на внутренней поверхности цилиндрических образцов (рис. 5).

Температура пятна нагрева T^* вычисляется при помощи мощности лазера, исходя из предварительных расчетов на основе технологического режима наплавки. Для калибровки температуры рассмотрены значения длины, оживляемой на k-м шаге дорожки, и значения коэффициента теплоотдачи. На рис. 6 и 7 показаны варианты расчета при варьировании длины оживляемой дорожки и коэффициента теплоотдачи.

Изменяя размер активируемого объёма, выявлены максимальные размеры длины оживляемого элемента, при которых относительная погрешность между численным и экспериментальным решением не превышает допустимое значение 5 %.

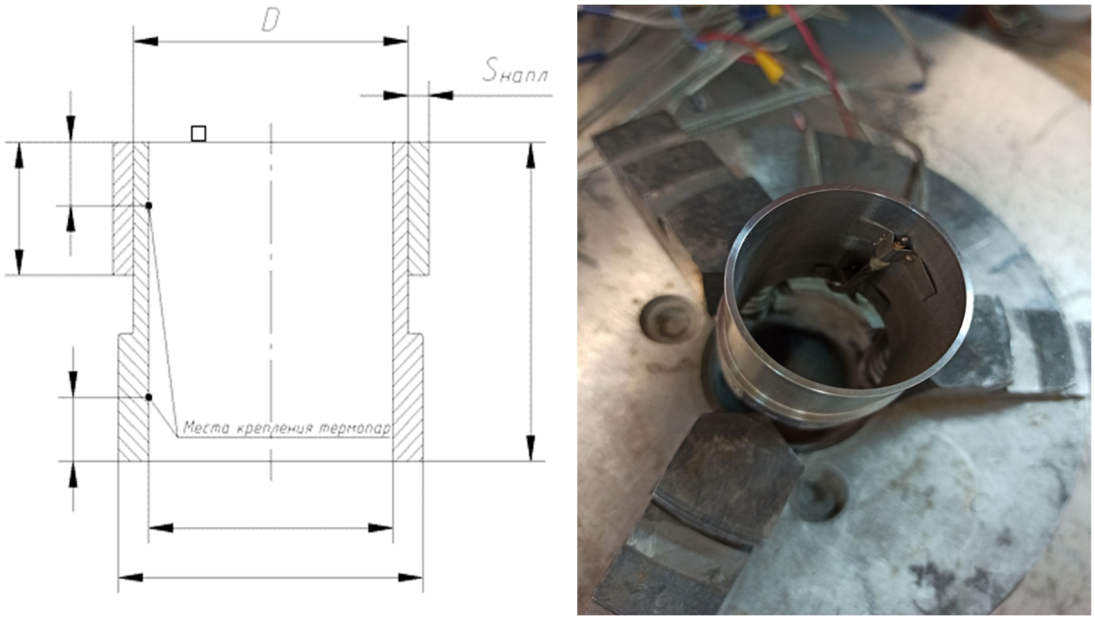
4. Решение механической структурной задачи по результатам решения тепловой задачи

В расчёте квазистатической задачи термомеханики был использован дискретный аналог конструкции, идентичный таковому в задаче теплопроводности. Температурный элемент SOLID279 был изменён на SOLID186, использующий перемещения в качестве узловых неизвестных. В расчёте задачи механики деформированного твердого тела решались уравнения (5)–(9).

В постановке краевой задачи механики не учитывается усадка материала в интервале отверждения (кристаллизации). Сделано это с целью повышения

устойчивости численного решения. При этом полагается, что вклад усадки в формирование напряженно-деформированного состояния готового изделия пренебрежимо мал, так как предел текучести материала в указанном температурном диапазоне примерно на 2 порядка ниже, чем при нормальных условиях.

На рис. 8 отмечены границы S_u, на которых запрещены все перемещения по уравнению (8).



a *b*

Рис. 5. Геометрические размеры (*a*) и фотография крепления термопар на цилиндрическом образце (*b*)

Fig. 5. Geometrical dimensions (*a*) and photo of thermocouple mounting on a cylindrical sample (*b*)

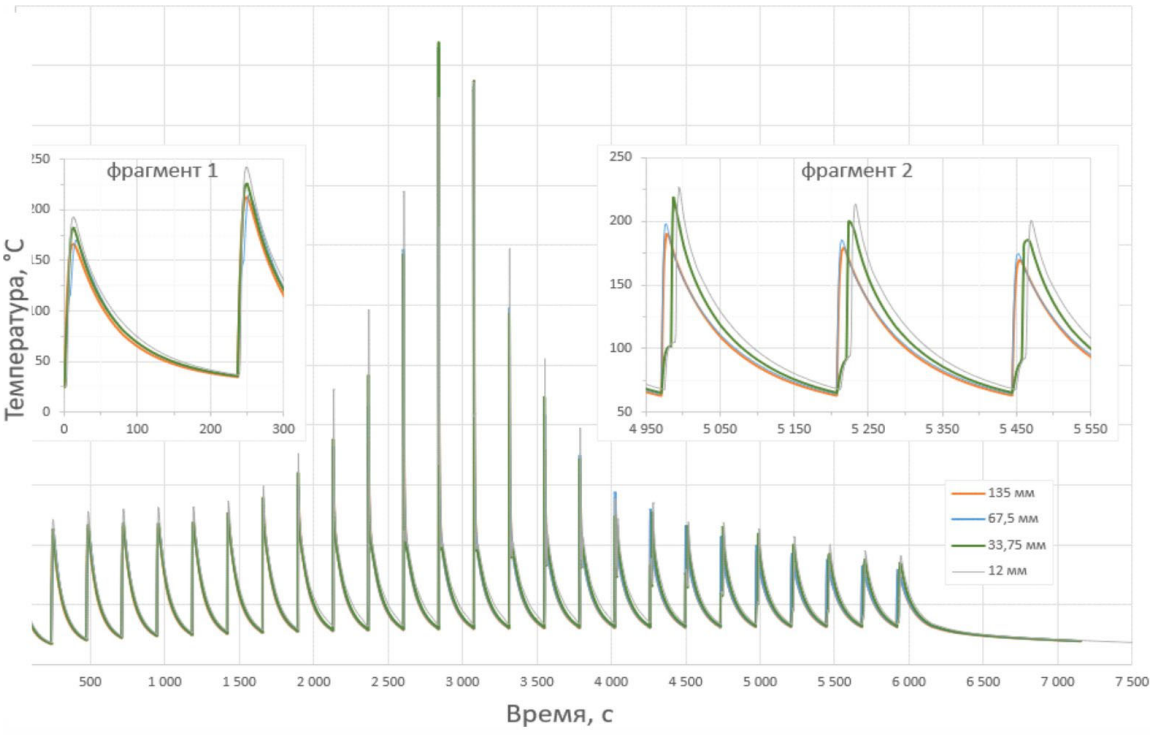


Рис. 6. Эволюция температур (°C) на верхней термопаре при варьировании длины оживляемой дорожки

Fig. 6. Evolution of temperatures (°C) at the top thermocouple with varying the length of the animated track

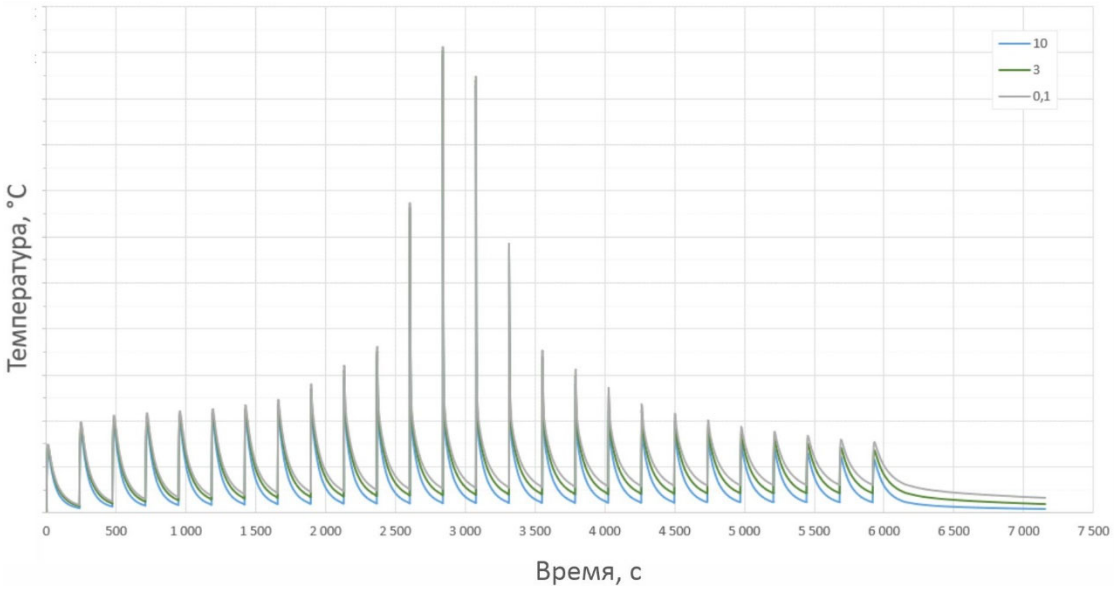


Рис. 7. Эволюция температур (°C) на верхней термопаре при варьировании коэффициента теплоотдачи

Fig. 7. Evolution of temperatures (°C) at the top thermocouple with varying the heat transfer coefficient

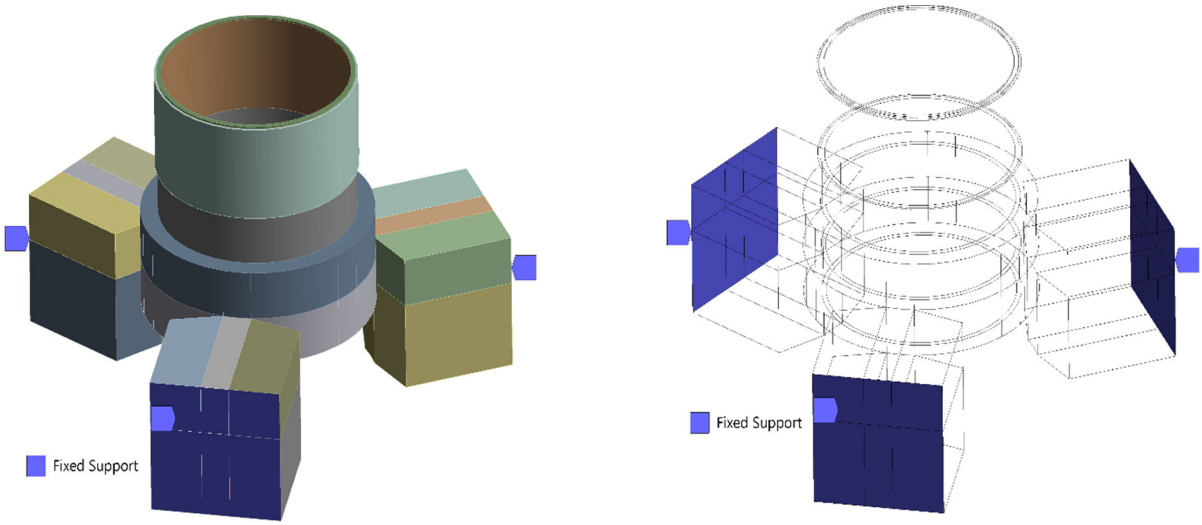


Рис. 8. Граничные условия

Fig. 8. Boundary conditions

На рис. 9 представлены перемещения после финальной выдержки. Соответствующие данному моменту эквивалентные пластические деформации представлены на рис. 10.

После процесса наплавки поле перемещений на внутреннем диаметре является неоднородным, поэтому для получения данных к верификации были оцифрованы наплавленные образцы и результаты снимались с деформированных профилей внутренней стенки образцов в 4 сечениях [35; 36]. Для этого построены соответствующие плоскости сечений, представленные на рис. 11.

С помощью интерполяции данных, снятых с плоскостей, были получены координаты профилей на равномерной сетке. По разнице между значениями для противоположных профилей каждой из 4 плоскостей были получены значения отклонения внутреннего диаметра от номинального значения:

$$\Delta D_i = \left(y_i^{II} - y_i^{I}\right) - D \qquad (17)$$

На рис. 12 представлена зависимость ΔD от вертикальной координаты, соответствующей диаметру точки (после деформации) для экспериментальных данных и численного расчёта. На диаграмме синие линии – экспериментальные данные, в том числе линия с усреднёнными значениями, чёрные линии – данные численного расчёта, красная линия – усреднённые значения численного расчёта.

Диапазон [0, 20] мм соответствует части образца с максимальной толщиной стенки. Наблюдаемое расхождение в данном диапазоне вызвано изначальными отклонениями в геометрии конструкции. Относительная погрешность в диапазоне максимальных перемещений не превышает 5 %.



Рис. 9. Поле суммарных перемещений в модели после процесса охлаждения, мм

Fig. 9. The field of total displacements in the model after the cooling process, mm

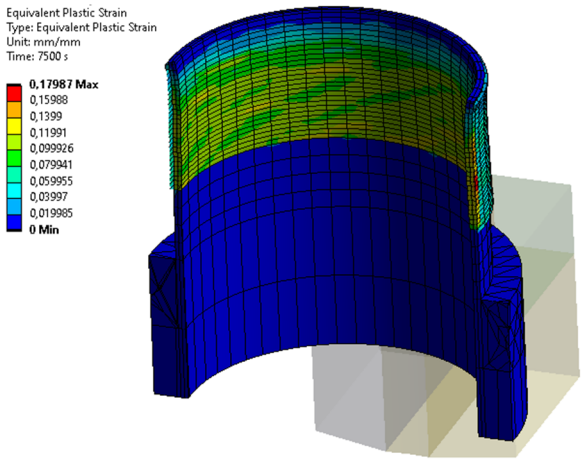


Рис. 10 Эквивалентные пластические деформации модели после процесса охлаждения, мм/мм

Fig. 10. Equivalent plastic deformations of the model after the cooling process, mm/mm

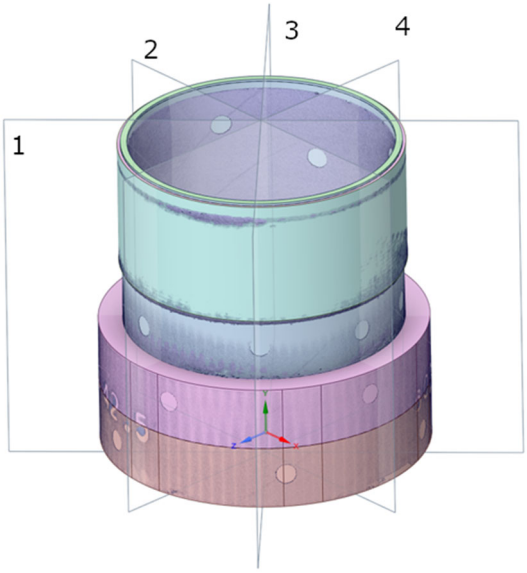


Рис. 11. Плоскости сечений

Fig. 11. Cross-section planes

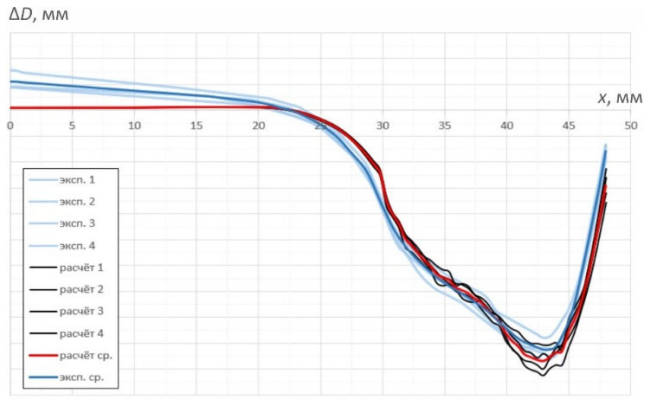


Рис. 12. Отклонение внутреннего диаметра образца от номинального значения после процесса охлаждения, мм

Fig. 12. Deviation of the inner diameter of the sample from the nominal value after the cooling process, mm

Заключение

В рамках работы разработан подход симуляции лазерной порошковой наплавки, основанный на поэтапной активации конечных элементов, принадлежащих слоям наплавляемого материала, без привязки этапов активации к геометрической и конечно-элементной моделям. Преимуществами данного подхода является возможность генерации высококачественных структурированных сеток и гибкая система изменения активируемого объёма элементов без необходимости перестройки геометрии и сетки. С учётом выбранного подхода симуляции лазерной порошковой наплавки, разработан соответствующий алгоритм моделирования процесса. Алгоритм подразумевает поэтапное решение краевой задачи нестационарной теплопроводности и краевой квазистатической задачи термомеханики в системе анализа Static Structural.

Подготовлена математическая модель краевой задачи нестационарной теплопроводности в процессе лазерной порошковой наплавки с конвективной теплоотдачей на адаптируемой внешней границе модели в процессе поэтапного изменения объёма модели.

Подготовлена математическая модель краевой задачи квазистатической термомеханики в процессе лазерной порошковой наплавки с учётом упругопластического поведения материалов ДСЕ и наплавляемого слоя.

Построена модель расчёта задачи теплопроводности в рамках процесса лазерной порошковой наплавки трубчатых образцов. Проведено качественное сравнение с результатами экспериментов.

Построена модель расчёта задач термомеханики в рамках симуляции процесса лазерной порошковой наплавки трубчатых образцов. Получена полигональная модель оцифрованной внешней поверхности образца после наплавки. Проведена обработка данной модели. По полученным данным профилей внутреннего диаметра после деформации проведена верификация результатов численной модели. Относительная погрешность в диапазоне максимальных перемещений не превысила 5 %.

Библиографический список

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

2. Numerical simulation of welding distortion in laser metal deposition additive manufacturing process / K. Dongauzer, M. Boyarshinov, M. Bekmansurov, D. Shamov // Key Engineering Materials. – 2022. – Vol. 910. – P. 338–343. 10.4028/p-3s97k6

3. Донгаузер К.А., Бояршинов М.Г., Бекмансуров М.Р. Численное моделирование деформаций в аддитивном технологическом процессе лазерной порошковой наплавки // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2022. – № 68. – С. 30–37.

4. Сметанников О.Ю., Максимов П.В., Трушников Д.Н. Исследование влияния параметров процесса 3D-наплавки проволочных материалов на формирование остаточных деформаций // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2019. – № 2. – С. 181–194.

5. Корсмик Р.С. Формирование наплавленного металла при лазерной наплавке и прямом лазерном выращивании с применением проволок // Znanstveba Misel. – 2019. – № 2-1 (27). – С. 41–49.

6. Шаронова Н.И., Рыков Е.В., Осипов С.Г. Технология восстановления деталей ГТД на специализированной отечественной установке для порошковой лазерной наплавки // Наука-производству. – 2017. – С. 137–148.

7. Ельцов В.В., Потехин В.П., Дитенков О.А. Математическое моделирование процесса формирования усадочного кратера при наплавке // Сварочное производство. – 2012. – № 1. – С. 9–16.

8. 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. – P. 3366–3373. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.01.054

9. Омелин А.А. Исследование моделирования процесса лазерной наплавки сплавов на никелевой основе // Электрофизические методы обработки в современной промышленности: материалы 4-й Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. – Пермь, 2021. – С. 320–325.

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.

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.

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

13. Войнов П.С., Беленький В.Я., Белинин Д.С. Возможности применения аддитивных технологий при конструировании и производстве вооружения, военной и специальной техники // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2021. – Т. 23, № 2. – С. 70–78.

14. Корсмик Р.С., Туричин Г.А., Климова-Корсмик О.Г. Лазерная порошковая восстановительная наплавка лопаток газотурбинного двигателя // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2016. – Т. 15, № 3.

15. Abhijit Singh, Ananya Nath, Shibendu Shekhar Roy Modeling of laser aided direct metal deposition of stainless steel using supervised deep learning algorithms // Materials today proceeding. – 2022. – Vol. 2, part 1. – P. 360–366.

16. Петрова М.П., Кукушкин А.А. Исследование возможности применения лазерной наплавки для восстановления износа плунжера топливного насоса высокого давления // История и перспективы развития транспорта на севере России. – 2019. – № 1. – С. 97–99.

17. Крылова С.Е., Завьялов В.А., Оплеснин С.П. Обеспечение эксплуатационных характеристик оборудования нефтегазодобывающей отрасли на основе совершенствования технологии газопорошковой лазерной наплавки // Вестник современных технологий. – 2019. – № 1 (13). – С. 19–25.

18. Рахимов Р.Р., Саубанов Р.Р., Звездин В.В. Технологическое обеспечение качества поверхности при лазерной наплавке с использованием плазменной очистки // Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий. – 2019. – Т. 1, № 10. – С. 294–298.

19. 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.

20. 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.

21. 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.

22. Никитюк Ю.В., Баевич Г.А., Мышковец В.Н. Применение метода конечных элементов и искусственных нейронных сетей для определения параметров лазерной обработки стали 12Н18Н9Т // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2022. – № 1(88). – С. 48–55.

23. A multiscale modeling approach for fast prediction of part distortion in selective laser melting / C. Li, C. Fu, Y. Guo, F. Fang // Journal of Materials Processing Technology. – 2016. – Vol. 229. – P. 703–712. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.10.022

24. Yuan M.G., Ueda Y. Prediction of residual stresses in welded T- and I-joints using inherent strains // Journal of Engineering Materials and Technology. – 1996. – Vol. 118, no. 2. – P. 229–234. DOI: 10.1115/1.2804892

25. Printability of alloys for additive manufacturing / T. Mukherjee, J.S. Zuback, A. De, T. Debroy // Scientific Reports. – 2016. – Vol. 6. – Article No. 9717. DOI: 10.1038/srep19717

26. Mitigation of thermal distortion during additive manufacturing / T. Mukherjee, V. Manvatkar, A. De, T. DebRoy // Scripta Materialia. – 2017. – Vol. 127. – P. 79–83. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2016.09.001.

27. Toward an integrated computational system for describing the additive manufacturing process for metallic materials / R. Martukanitz, P. Michaleris, T. Palmer, T. DebRoy, Z.-K. Liu, R. Otis [et al.] // Additive Manufacturing. – 2014. – Vol. 1. – P. 52–63. DOI: 10.1016/j.addma.2014.09.002

28. Michaleris P. Modeling metal deposition in heat transfer analyses of additive manufacturing processe // Finite Elements in Analysis and Design. – 2014. – Vol. 86. – P. 51–60. DOI: 10.1016/j.finel.2014.04.003

29. Denlinger E.R., Michaleris P. Effect of stress relaxation on distortion in additive manufacturing process modeling // Additive Manufacturing. – 2016. – Vol. 12. – P. 51–59.

30. Мальцев А.С., Максимов П.В. Численное моделирование контактных напряжений в платиках при клеевом и сварочном соединении элементов маятникового акселерометра // Математика и междисциплинарные исследования – 2020: материалы всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием. – Пермь, 2020. – С. 112–115.

31. Муругова О.В., Никифоров Р.В. Новые разработки в области компьютерных расчетов для производства сварных конструкций // Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. – Уфа, 2019. – С. 393–397.

32. Labudovic M., Hu D., Kovacevic R. A three dimensional model for direct laser metal powder deposition and rapid prototyping // Journal of Materials Science. – 2003. – Vol. 38, no. 1. – P. 35–49.

33. 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.

34. Computational modeling of residual stress formation during the electron beam melting process for Inconel 718 / P. Prabhakar, W. Sames, R. Dehoff, S. Babu // Additive Manufacturing. – 2015. – Vol. 7. – P. 83–91. DOI: 10.1016/j.addma.2015.03.003

35. Лупин Г.А. Принципы измерений при помощи оптической координатно-измерительной топометрической системы ATOS // Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы (биомедсистемы-2021): сборник трудов 34-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. – Рязань, 2021. – С. 304–308.

36. Решетникова О.В. Сравнительный анализ перспективных контактных и бесконтактных средств контроля // Юность и знания – гарантия успеха – 2019: сборник научных трудов 6-й Международной молодежной научной конференции. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2019. – Т. 3. – С. 283–285.

References

1. King W., Anderson A., Ferencz R., Hodge N., Kamath C., Khairallah S. 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.

2. Dongauzer K., Boyarshinov M., Bekmansurov M. & Shamov D. Numerical Simulation of Welding Distortion in Laser Metal Deposition Additive Manufacturing Process. *Key Engineering Materials*, 2022, vol. 910, pp. 338-343. 10.4028/p-3s97k6.

3. Dongauzer K. A., Boyarshinov M. G., Bekmansurov M. R. Chislennoe modelirovanie deformatsii v additivnom tekhnologicheskom protsesse lazernoi poroshkovoi naplavki [Numerical simulation of welding distortion in laser metal deposition additive manufacturing process]. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2022, no. 68, pp. 30-37.

4. Smetannikov O. Yu., Maksimov P. V., Trushnikov D. N. Issledovanie vliianiia parametrov protsessa 3D-naplavki provolochnykh materialov na formirovanie ostatochnykh deformatsii [Studying of the influence of 3D wire deposition process parameters on the formation of residual deformation]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2019, no.2, pp. 181-194.

5. Korsmik R. S. Formirovanie naplavlennogo metalla pri lazernoi naplavke i priamom lazernom vyrashchivanii s primeneniem provolok [Formation of cladded metal during the laser cladding and direct laser deposition using filler wires]. *Znanstveba Misel*, 2019, no.2-1 (27), pp. 41-49.

6. Sharonova N. I., Rykov E. V., Osipov S. G. Tekhnologiia vosstanovleniia detalei GTD na spetsializirovannoi otechestvennoi ustanovke dlia poroshkovoi lazernoi naplavki. *Nauka-proizvodstvu*, 2017, pp. 137-148.

7. El'tsov V. V., Potekhin V. P., Ditenkov O. A. Matematicheskoe modelirovanie protsessa formirovaniia usadochnogo kratera pri naplavke. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2012, no.1, pp. 9-16.

8. Li C., Wang Y., Zhan H., Han T., Han B., Zhao W. 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. doi: 10.1016/j.matdes.2010.01.054.

9. Omelin A. A. Issledovanie modelirovaniia protsessa lazernoi naplavki splavov na nikelevoi osnove [Research of simulation of the process of laser processing of nickel-based alloys]. *Elektrofizicheskie metody obrabotki v sovremennoi promyshlennosti: Materialy 4 Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov* (Electrophysical machining in modern industry: Proceeding of International scientific-practical conference of young scientists, graduate and students). Perm, 2021, pp. 320-325.

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. Ibiye A. Roberts et al. Experimental and Numerical Analysis of Residual Stresses in Additive Layer Manufacturing by Laser Melting of Metal Powders. *Key Engineering Materials*, 2011, vol. 450, pp. 461-465.

12. Parry L., Ashcroft I., Bracket D., Wildman R.D. Investigation of Residual Stresses in Selective Laser Melting. *Key Engineering Materials*, 2015, vol. 627, pp. 129-132.

13. Voinov P. S., Belen'kii V. Ia., Belinin D. S. Vozmozhnosti primeneniia additivnykh tekhnologii pri kostruirovanii i proizvodstve vooruzheniia, voennoi i spetsial'noi tekhniki [Possibilities of additive technologies application in designing and manufacturing of weapons of military equipment]. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2021, vol.23, no.2, pp. 70-78.

14. Korsmik R. S., Turichin G. A., Klimova-Korsmik O. G. Lazernaia poroshkovaia vosstanovitel'naia naplavka lopatok gazoturbinnogo dvigatelia. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaia tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie – Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 2016, vol. 15, no.3.

15. Abhijit Singh, Ananya Nath, Shibendu Shekhar Roy Modeling of laser aided direct metal deposition of stainless steel using supervised deep learning algorithms. *Materials today proceeding*, 2022, vol. 2, part1, pp. 360-366.

16. Petrova M. P., Kukushkin A. A. Issledovanie vozmozhnosti primeneniia lazernoi naplavki dlia vosstanovleniia iznosa plunzhera toplivnogo nasosa vysokogo davleniia [Research of possibility of application of laser surfacing to restore the wear of the plunger of the fuel high-pressure pump]. *Istoriia i perspektivy razvitiia transporta na severe Rossii*, 2019, no.1, pp. 97-99.

17. Krylova S. E., Zav'ialov V. A., Oplesnin S. P. Obespechenie ekspluatatsionnykh kharakteristik oborudovaniia neftegazodobyvaiushchei otrasli na osnove sovershenstvovaniia tekhnologii gazoporoshkovoi lazernoi naplavki [Ensuring operational

characteristics of the equipment of the oil and gas extraction industry on the basis of improvement of technology of gas powder building up]. *Vestnik sovremennykh tekhnologii*, 2019, no.1 (13), pp. 19-25.

18. Rakhimov R. R., Saubanov R. R., Zvezdin V. V. Tekhnologicheskoe obespechenie kachestva poverkhnosti pri lazernoi naplavke s ispol'zovaniem plazmennoi ochistki. *Nizkotemperaturnaia plazma v protsessakh naneseniia funktsional'nykh pokrytii*, 2019, vol. 1, no. 10, pp. 294-298.

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

20. 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.

21. Riedlbauer D., Mergheim J., McBride A., Steinmann P. Macroscopic modelling of the selective beam melting process. *Proc. Appl. Math. Mech*, 2012, vol. 12, no.1, pp. 381–382.

22. Nikitiuk Iu. V., Baevich G. A., Myshkovets V. N. Primenenie metoda konechnykh elementov i iskusstvennykh neironnykh setei dlia opredeleniia parametrov lazernoi obrabotki stali 12N18N9T [Application of finite element method and artificial neural networks to determine parameters for laser treatment 0f 12X18H9T steel]. *Vestnik GGTU im. P. O. Sukhogo – Educational Institution "Sukhoi State Technical University of Gomel*, 2022, no. 1(88), pp. 48-55.

23. Li C, Fu C, Guo Y, Fang F. A multiscale modeling approach for fast prediction of part distortion in selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, vol.229, pp. 703–712. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2015.10.022.

24. Yuan MG, Ueda Y. Prediction of residual stresses in welded T- and I-joints using inherent strains. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1996, vol.118, no.2, pp. 229–234. doi: 10.1115/1.2804892.

25. Mukherjee T, Zuback JS, De A, Debroy T. Printability of alloys for additive manufacturing. *Scientific Reports*, 2016, vol. 6, no. 9717. doi: 10.1038/srep19717.

26. Mukherjee T, Manvatkar V, De A, DebRoy T. Mitigation of thermal distortion during additive manufacturingю *Scripta Materialia*, 2017, vol.127, pp. 79–83. doi: 10.1016/j.scriptamat.2016.09.001.

27. Martukanitz R, Michaleris P, Palmer T, DebRoy T, Liu Z-K, Otis R, et al. Toward an integrated computational system for describing the additive manufacturing process for metallic materials. *Additive Manufacturing*, 2014, vol.1, pp. 52–63. doi: 10.1016/j.addma.2014.09.002.

28. Michaleris P. Modeling metal deposition in heat transfer analyses of additive manufacturing processe. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2014, vol. 86, pp. 51–60. doi: 10.1016/j.finel.2014.04.003.

29. Denlinger ER, Michaleris P. Effect of stress relaxation on distortion in additive manufacturing process modeling. *Additive Manufacturing*, 2016, vol. 12, pp. 51–59.

30. Mal'tsev A. S., Maksimov P. V. Chislennoe modelirovanie kontaktnykh napriazhenii v platikakh pri kleevom i svarochnom soedinenii elementov maiatnikovogo akselerometra [Numerical modeling of contact stresses during glue or welding of pendulum accelerometer elements]. *Matematika i mezhdistsiplinarnye issledovaniia – 2020: Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem*. Perm, 2020, pp. 112-115.

31. Murugova O. V., Nikiforov R. V. Novye razrabotki v oblasti komp'iuternykh raschetov dlia proizvodstva svarnykh konstruktsii [New development in the field of computer calculations for the production of welded constructions]. *Stankostroenie i innovatsionnoe mashinostroenie. Problemy i tochki rosta: Materialy Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. Ufa, 2019, pp. 393-397.

32. Labudovic M, Hu D, Kovacevic R. A three dimensional model for direct laser metal powder deposition and rapid prototyping. *Journal of Materials Science*, 2003, vol. 38, no.1, pp. 35–49.

33. 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.

34. Prabhakar P, Sames W, Dehoff R, Babu S. Computational modeling of residual stress formation during the electron beam melting process for Inconel 718. *Additive Manufacturing*, 2015, vol.7, pp. 83–91. doi: 10.1016/j.addma.2015.03.003.

35. Lupin G. A. Printsipy izmerenii pri pomoshchi opticheskoi koordinatno-izmeritel'noi topometricheskoi sistemy ATOS [Measurement principles with ATOS optical coordinate measuring topometric system]. *Biotekhnicheskie, meditsinskie i ekologicheskie sistemy, izmeritel'nye ustroistva i robototekhnicheskie kompleksy (biomedsistemy-2021): Sbornik trudov 34 Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, molodykh uchenykh i spetsialistov*. Riazan', 2021, pp. 304-308.

36. Reshetnikova O. V. Sravnitel'nyi analiz perspektivnykh kontaktnykh i beskontaktnykh sredstv kontrolia. *Iunost' i znaniia – garantiia uspekha – 2019: sbornik nauchnykh trudov 6-i Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii*. Kursk, 2019, vol. 1, pp 283-285.

Финансирование. Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты» и выполнения государственного задания – FSNM-2021-0011.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.

Funding. The research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of the implementation of the national project "Science and Universities" and the implementation of the state assignment - FSNM-2021-0011.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

The contribution of the authors is equivalent.