

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Научная статья

УДК 778.64

URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=179123>

РАСЧЕТ КОМПЕНСАЦИИ КОРОБЛЕНИЯ ОТ ДЕЙСТВИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В АДДИТИВНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Александр Исаакович Хаймович¹, Андрей Владимирович Балякин², Максим Андреевич Олейник³✉, Илья Сергеевич Степаненко⁴, Артем Андреевич Мешков⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева (Самарский университет),

Самара, Россия

¹berill_samara@bk.ru

²balaykinav@ssau.ru

³oleynik1997@mail.ru ✉

⁴iliya.stepanenko@gmail.com

⁵artem92-42dml@yandex.ru

Аннотация. При аддитивном производстве необходимо учитывать и компенсировать коробление детали вследствие действия остаточных напряжений. Одним из эффективных быстрых методов расчета величины короблений в САЕ-системах является механический конечно-элементный анализ, не требующий многочисленных итераций. Для обеспечения точности расчетов в САЕ-системах их необходимо калибровать на специальных образцах. В работе предложена методика такой калибровки на кольцевых образцах для процесса прямого лазерного выращивания (ПЛВ), результатом которой являются значения внутренних деформаций, необходимых для расчета деформаций деталей при ПЛВ.

С помощью САЕ-системы Simufact Additive была спроектирована цифровая модель процесса ПЛВ и проведено моделирование действия остаточных напряжений. На основе полученных результатов сравнения с натурными образцами скорректированы расчетные параметры, которые можно применить для оптимизации геометрии заготовок деталей с учетом особенностей процесса ПЛВ.

Ключевые слова: аддитивное производство, прямое лазерное выращивание, деформации после выращивания, остаточные напряжения в структуре материала, метод конечных элементов, хромоникелевый жаропрочный сплав ЭП648, регрессионный анализ, калибровка САЕ-системы

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства по теме: «Организация высокотехнологичного производства промышленных ГТД с интеллектуальной системой конструкторско-технологической подготовки для повышения функциональных характеристик» (Соглашение о предоставлении гранта № 075-11-2021-042 от 24.06.2021).

Для цитирования: Хаймович А.И., Балякин А.В., Олейник М.А., Степаненко И.С., Мешков А.А. Расчет компенсации коробления от действия остаточных напряжений в аддитивном производстве // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 1. С. 215–225. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=179123>

MACHINE-BUILDING ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Original article

COMPUTATION OF WARPING COMPENSATION FROM RESIDUAL STRESSES IMPACT IN ADDITIVE PRODUCTION

Aleksandr I. Khaimovich¹, Andrei V. Balyakin², Maksim A. Oleinik³✉, Il'ya S. Stepanenko⁴, Artem A. Meshkov⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Samara National Research University,

Samara, Russia

¹ berill_samara@bk.ru

² balaykinav@ssau.ru

³ oleynik1997@mail.ru ✉

⁴ iliya.stepanenko@gmail.com

⁵ artem92-42dml@yandex.ru

Abstract

In recent years, additive manufacturing, also known as 3D printing, has been widely recognized and has become one of the fastest growing technologies in the field of manufacturing. Additive manufacturing has become an innovative manufacturing technology used in the aerospace, energy, biomedical and automotive fields due to its advantageous ability to quickly produce complex-profile blanks. The aerospace industry is actively using additive technologies due to several factors:

1. Increasing the functionality and reducing the weight of the final products. Due to the optimal placement of the material and a reduction in the number of parts, it is possible to significantly reduce the mass of propulsion systems, which leads to an improvement in the operational characteristics of aircraft.

2. Reduction of production costs. Due to the use of additive technologies, it is possible to simplify the manufacture of complex components, such as elements of gas turbine engines and liquid propellants, which reduces the cost of expensive tooling and manual labor. Also, significant benefits can be obtained at the R&D stage due to the reduction in the production time of prototypes and the downtime of the design department.

To obtain large-sized blanks of complex geometric shape from heat-resistant nickel alloys, an additive technological process of direct supply of energy and material is used, known as direct metal deposition (DMD). The use of direct laser cultivation in the production of products made of metal-powder compositions, including aluminum, titanium, heat-resistant alloys and stainless steels, is becoming increasingly common. This technology is particularly in demand in the aircraft engine industry, where heat-resistant steels and alloys are used to manufacture key components of gas turbine engines. In addition, direct laser cultivation has found application in the production of functional parts. However, there is a need to develop a technique for designing workpieces that would take into account the warping caused by residual stresses arising during direct metal deposition. The use of warping compensation from residual stresses will not only eliminate subjective factors affecting the quality of manufactured products, but also reduce labor costs and the cost of developing a technological process for obtaining blanks. Currently, the use of nickel materials in the field of additive technologies is limited by the peculiarities of ultrafast crystallization processes, which causes the accumulation of significant internal stresses, which leads to the formation of micro- and macro-defects.

In general, the residual stresses acting on the part during welding are the result of the action of residual deformations: thermal, mechanical, shrinkage, creep, phase transition. These residual deformations are the result of the action of the heat source. Excellent material properties, such as fatigue strength and tensile strength, directly depend on the microstructure of the parts. Therefore, the presence of residual stresses is not desirable, since they can cause plastic deformation of the connected parts. Various studies describe the modeling of thermomechanical processes with intense deformations in technological systems. The influence of the connection direction on the magnitude of residual stresses has also been investigated. In the process of laser synthesis of thin blanks, significant deformations occur due to the effect of residual stresses from thermal loads, which leads to the marriage of products. Therefore, the development of methods for compensation of residual stresses is an urgent task.

Keywords: additive manufacturing, direct metal deposition, deformations after deposition, residual stresses in the material structure, finite element method, EP648 chromium-nickel heat-resistant alloy, regression analysis, CAE system calibration

Funding: the work was financed by the Russian Ministry of Education and Science as part of a comprehensive project on high-tech production creation on the subject of “High-tech production organization of industrial gas turbine engines with an intelligent design and technological preparation system for improving functional characteristics” (Grant Agreement No. 075-11-2021 -042 dated 06/24/2021).

For citation: Khaimovich A.I., Balyakin A.V., Oleinik M.A., Stepanenko I.S., Meshkov A.A. Computation of Warping Compensation from Residual Stresses Impact in Additive Production. *Aerospace MAI Journal*, 2024, vol. 31, no. 1, pp. 215-225. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=179123>

Введение

В последние годы аддитивное производство (АП), также известное как 3D-печать, получило широкое признание и стало одной из самых быстро развивающихся технологий в области производства. Аддитивное производство стало инновационной производственной технологией, применяемой в аэрокосмической, энергетической, биомедицинской и автомобильной областях благодаря своей выгодной способности быстро изготавливать сложнопрофильные заготовки. Аэрокосмическая отрасль активно использует аддитивные технологии благодаря нескольким факторам:

1. Повышение функциональности и снижение массы конечных изделий. За счет оптимального размещения материала и уменьшения количества деталей можно существенно снизить массу двигательных установок, что приводит к улучшению эксплуатационных характеристик летательных аппаратов.

2. Снижение затрат на производство. За счет использования аддитивных технологий можно упростить изготовление сложных компонентов, таких как элементы ГТД и ЖРД, что позволяет сократить затраты на дорогостоящую оснастку и ручной труд. Также значительные выгоды можно получить на стадии ОКР благодаря сокращению времени изготовления опытных образцов и простоту конструкторского подразделения.

Для получения крупногабаритных заготовок сложной геометрической формы из жаропрочных никелевых сплавов применяют аддитивный технологический процесс прямого подвода энергии и материала известный как прямое лазерное выращивание (ПЛВ) [1, 2]. Применение прямого лазерного выращивания в производстве изделий из металлопорошковых композиций, включая алюминиевые, титановые, жаропрочные сплавы и нержавеющей стали, становится все более распространенным. Эта технология особенно востребована в авиадвигателестроении, где жаропрочные стали и сплавы

используются для изготовления ключевых компонентов газотурбинных двигателей. Кроме того, прямое лазерное выращивание нашло применение в производстве функциональных деталей. Однако возникает необходимость разработки методики проектирования заготовок, которая учитывала бы коробление, вызванное остаточными напряжениями, возникающими в процессе прямого лазерного выращивания. Применение компенсации коробления от остаточных напряжений позволит не только исключить субъективные факторы, влияющие на качество изготовленных изделий, но и сократить трудозатраты и стоимость разработки технологического процесса получения заготовок. В настоящее время применение никелевых материалов в области аддитивных технологий ограничивается особенностями процессов сверхбыстрой кристаллизации, вызывающей накопление значительных внутренних напряжений, что ведет к образованию микро- и макродефектов [3, 4].

В общем случае, остаточные напряжения, действующие на деталь в процессе сварки, являются результатом действия остаточных деформаций: термических, механических, усадочных, ползучести, фазового перехода. Эти остаточные деформации являются результатом действия теплового источника [5]. Отличные свойства материалов, такие как усталостная прочность и прочность на растяжение, напрямую зависят от микроструктуры деталей. Поэтому наличие остаточных напряжений нежелательно, так как они могут вызвать пластическую деформацию соединенных деталей [6–8]. В различных исследованиях описывается моделирование термомеханических процессов с интенсивными деформациями в технологических системах [9, 10]. Влияние направления соединения на величину остаточных напряжений также исследовано. В процессе лазерного синтеза тонких заготовок возникают значительные деформации из-за действия остаточных напряжений от тепловых нагрузок, что ведет к браку изделий. Поэтому разработка методов

компенсации остаточных напряжений является актуальной задачей.

Одним из наиболее часто используемых подходов при прогнозировании остаточных напряжений и деформаций для АП является термомеханический анализ [11, 12], в котором по тепловой нагрузке вычисляются поля деформаций и напряжений. Существуют различные программные продукты, как правило, основанные на методе конечных элементов – САЕ-системы, которые можно использовать при моделировании теплонапряженного состояния детали. Помимо традиционного термомеханического анализа, состоящего из двух циклов теплового и механического, существует упрощенный механический анализ, основанный на методе внутренних деформаций [13].

Внутренняя деформация определяется как отношение изменения расстояния между точками в состоянии снятия напряжения к исходному состоянию. Для применения этой теории на практике принимается допущение, что упругая деформация не так важна, как пластическая деформация [14].

При приемлемой точности упрощенный механический анализ существенно производительнее сопряженного термомеханического анализа, поскольку не является итерационным процессом, требующим перерасчета напряженно-деформированного состояния по мере формирования новых слоев материала в случае сопряженного анализа. Для обеспечения достаточной точности расчетов в САЕ-системах, их необходимо калибровать на специальных образцах. Обычно используются об-

разцы типа «консоль» [15] (рис. 1,а) или типа «мост» (рис. 1,б) [16].

Цель исследования

Как уже было отмечено, при аддитивном производстве необходимо учитывать и компенсировать коробление детали вследствие действия остаточных напряжений. Одним из эффективных быстрых методов расчета величины короблений в САЕ-системах является механический конечно-элементный анализ, не требующий многочисленных итераций. Точность этого метода зависит от калибровки САЕ-системы под конкретные условия выращивания на специальных образцах. Если для процесса селективного лазерного сплавления технология калибровки отработана, то для ПЛВ существует насущная потребность в разработке такого метода. Особенно это касается выращивания кольцевых деталей в т. ч. с учетом величины их коробления при отделении от платформы.

Методика исследования, материалы и образцы

Алгоритм коррекции деталей из металлопорошковой композиции (МПК) жаропрочного сплава ЭП648 для компенсации действия остаточных напряжений заключается в следующем:

– на отработанном режиме (табл. 1) выращиваются кольцевые образцы и измеряется искажение формы, определяется относительное отклонение от круглости в сечениях кольца (рис. 2);

Таблица 1

Оптимизированный режим выращивания из МПК сплава ЭП648

| Технологические параметры режима выращивания | |
|--|------|
| Мощность, Вт | 2000 |
| Скорость, мм/с | 25 |
| Диаметр пятна, мм | 2,7 |
| Ширина валика, мм | 2,5 |
| Смещение по ширине, мм | 1,67 |
| Смещение по высоте, мм | 0,8 |

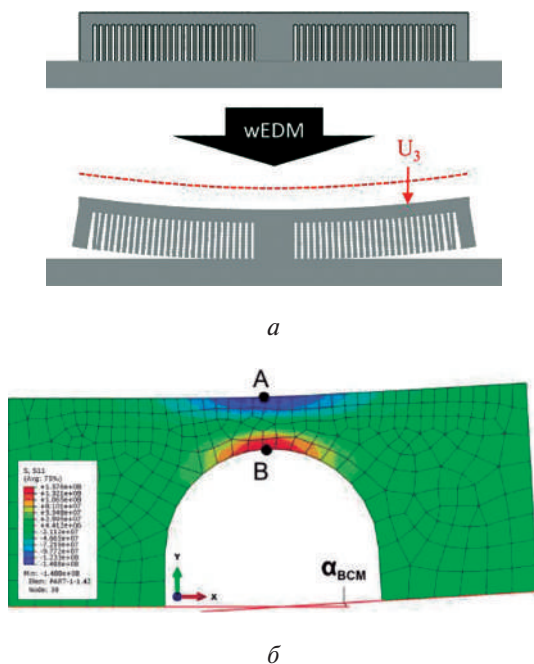


Рис. 1. Калибровочные образцы типа «консоль» (а) и «мост» (б)

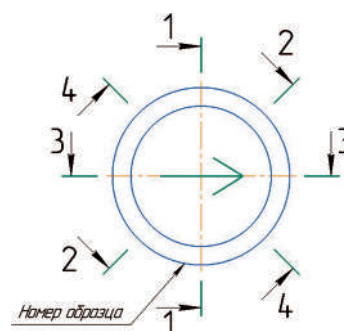


Рис. 2. Схема измерения калибровочных образцов

– в системе компьютерного моделирования, например Simufact Additive, проводится виртуальный эксперимент с использованием механического расчетного метода с применением различных величин главных компонентов тензора внутренних остаточных деформаций в соответствии с разработанным планом эксперимента и определяются расчетные отклонения от круглости;

– проводят регрессионный анализ и получают регрессионные модели отклонений от круглости по данным виртуального эксперимента;

– методом наименьших квадратов определяют компоненты внутренних деформаций, минимизирующих различия между данными виртуального и натурального экспериментов, т. е. получают откалиброванные значения тензора внутренних остаточных деформаций;

– рассчитывают параметры коррекции заготовки с использованием откалиброванных значений тензора внутренних остаточных деформаций.

С целью апробации этой методики были выращены натурные кольцевые калибровочные образцы



Рис. 3. Калибровочные кольцевые образцы

(рис. 3). Выращивание методом ПЛВ производилось на установке ИЛИСТ-L (СПбГМТУ, Санкт-Петербург, Россия) при помощи четырехструйного коаксиального сопла с углом раствора 45° на предварительно оптимизированных технологических режимах (табл. 1), из металлопорошковой композиции жаропрочного сплава ЭП648 (ХН50ВМТЮБ), табл. 2, материал подложки – сталь 3. Внешний диаметр колец составлял 50,0 мм, толщина стенки 6,0 мм, высота 15,0 мм.

Контрольными величинами, характеризующими внутренние остаточные деформации на заданном оптимальном режиме выращивания (табл.1), являлись диаметры образца в четырех сечениях согласно схеме, представленной на рис. 2. Образцы измерялись до и после отделения от подложки с использованием электроэрозионной резки для исключения внесения дополнительных напряжений. Высота отрезанных образцов составила 10 мм.

Результаты натуральных и численных экспериментов и их обработка

В табл. 3 представлены результаты измерения калибровочных кольцевых образцов до и после отделения от подложки для построения.

При конечно-элементном моделировании механическим расчетным методом в САЕ-системе Simufact Additive начальные значения тензора внутренних деформаций (табл. 4) брались для этого сплава по данным для селективного лазерного сплавления. На основе этих данных рассчитываются оценочные коэффициенты тензора внутренних остаточных деформаций (табл. 4) и подготавливается план виртуальных экспериментов (табл. 5).

Таблица 2

Массовая доля элементов в МПК сплава ЭП648 (ТУ 14-1-1072-74)

| Массовая доля элементов, % | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|-----|-------|-------|-------|--------|---------|---------|--------|
| Ni | Cr | W | Mo | V | Ti | Al | Fe | C | Si | Mn | Ce | B | P | S |
| Основа | 32–35 | 4,3–5,3 | 2,3–3,3 | 0,5–1,1 | 0,5–1,1 | 0,5–1,1 | < 4 | < 0,1 | < 0,4 | < 0,5 | < 0,03 | < 0,008 | < 0,015 | < 0,01 |

Таблица 3

Результаты измерения калибровочных кольцевых образцов

| Образец | I | | | | | | II | | | | | III | | | | | |
|-------------------------|------------------------|------|------|------|---------|--------|------|------|------|------|---------|------|------|------|------|-------|---------|
| | 1*–1 | 2–2 | 3–3 | 4–4 | Среднее | | 1–1 | 2–2 | 3–3 | 4–4 | Среднее | | 1–1 | 2–2 | 3–3 | 4–4 | Среднее |
| На платформе | Сечение | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Диаметр внешний, мм | 50,3 | 50,4 | 50,4 | 50,1 | 50,3 | 50,2 | 50 | 50,6 | 50,5 | 50,325 | 50,4 | 50,4 | 50,3 | 50,5 | 50,4 | |
| | Диаметр внутренний, мм | 38,4 | 38,9 | 38,4 | 38,3 | 38,5 | 38,6 | 38,2 | 38,4 | 38,6 | 38,45 | 38,9 | 38,8 | 38,5 | 38,9 | 38,78 | |
| | Высота, мм | 15,1 | | | | | 15,2 | | | | | 15,1 | | | | | |
| | Толщина стенки, мм | 5,95 | 5,75 | 6,0 | 5,9 | 5,9 | 5,8 | 5,9 | 6,1 | 5,95 | 5,9375 | 5,75 | 5,8 | 5,9 | 5,8 | 5,813 | |
| Отделенные от платформы | Диаметр наружный, мм | 50,1 | 50,1 | 50,2 | 50,3 | 50,175 | 50,3 | 50,2 | 50,4 | 50,5 | 50,35 | 50 | 50,1 | 50,3 | 50,2 | 50,15 | |
| | Диаметр внутренний, мм | 38,3 | 38,4 | 38,4 | 38,0 | 38,275 | 38,7 | 38,2 | 38,6 | 38,5 | 38,5 | 38,9 | 38,9 | 38,7 | 38,9 | 38,85 | |
| | Высота, мм | 10,0 | | | | | 10,0 | | | | | 10,0 | | | | | |
| | Толщина стенки, мм | 5,9 | 5,85 | 5,9 | 6,15 | 5,95 | 5,8 | 6,0 | 5,9 | 6 | 5,93 | 5,55 | 5,6 | 5,8 | 5,65 | 5,65 | |

Таблица 4
Оценочные коэффициенты тензора внутренних остаточных деформаций
и уровни его варьирования

| Параметр режима | Начальное значение | Минимум | Максимум | Уровни варьирования | Дельта |
|-----------------|--------------------|----------|----------|---------------------|----------|
| e_x | -0.00520426 | -0.00364 | -0.00677 | 1 | -0.00156 |
| e_y | -0.00233375 | -0.00163 | -0.00303 | 2 | -0.0007 |
| e_z | -0.021733 | -0.01521 | -0.02825 | 3 | -0.00652 |

Таблица 5

Дробный факторный план виртуальных экспериментов

| № | Внутренняя деформация, e_x | Внутренняя деформация, e_y | Внутренняя деформация, e_z |
|---|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1 | -0.003643 | -0.00163363 | -0.0152131 |
| 2 | -0.003643 | -0.00233375 | -0.0282529 |
| 3 | -0.003643 | -0.00303388 | -0.021733 |
| 4 | -0.0052043 | -0.00163363 | -0.0282529 |
| 5 | -0.0052043 | -0.00233375 | -0.021733 |
| 6 | -0.0052043 | -0.00303388 | -0.0152131 |
| 7 | -0.0067655 | -0.00163363 | -0.021733 |
| 8 | -0.0067655 | -0.00233375 | -0.0152131 |
| 9 | -0.0067655 | -0.00303388 | -0.0282529 |

Согласно дробному плану эксперимента (табл. 5) проведена серия расчетов с целью получения и дальнейшего сравнения контрольных величин диаметров в четырех сечениях. Результаты моделирования одного из виртуальных экспериментов серии описаны далее.

В процессе наплавления напряжения сосредотачиваются в нижних слоях и на внешнем диаметре, достигая при этом максимального значения 1056 МПа. В области нижнего внутреннего диаметра напряжения минимальны и составляют 100 МПа (рис. 4).

После наплавления всех слоев напряжения распределяются по всем слоям изготовленного

кольцевого образца, но напряжения в нижних слоях сохраняются (рис. 5).

Несмотря на сосредоточенность напряжений в нижних слоях, деформация ограничена базовой плитой, на которой происходит выращивание. Результаты моделирования показывают, что максимальное значение деформации от действия остаточных напряжений составляет 0,03 мм (рис. 6).

Аппроксимация результатов численных экспериментов по факторному плану методом регрессионного анализа проводилась по зависимости:

$$\delta(e_x, e_y, e_z) = k_0 + k_x e_x + k_y e_y + k_z e_z + k_{xy} e_x e_y + k_{xz} e_x e_z + k_{yz} e_y e_z + k_{xyz} e_x e_y e_z. \quad (1)$$

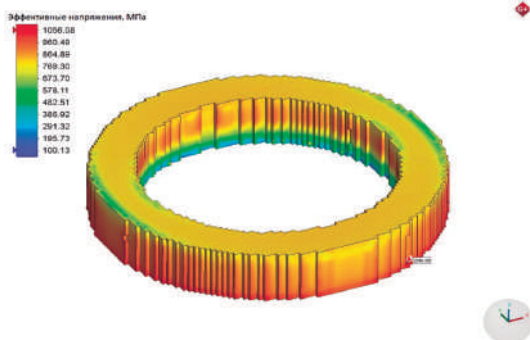


Рис. 4. Действующие напряжения в процессе наплавления на одном из виртуальных экспериментов



Рис. 5. Итоговые напряжения на одном из виртуальных экспериментов

Результаты регрессионного анализа для трех измеренных колец представлены в табл. 6.

График сопоставления наблюдаемых деформаций в 4-х точках контроля и их предсказанных значений по зависимости (1) с коэффициентами табл. 6 приведен на рис. 7. Коэффициенты детерминации регрессионных зависимостей по (1) приведены в последнем столбце табл. 6. Матрица коэффициентов регрессии для 4-х точек измерений имеет вид:

$$K = \begin{pmatrix} k_{10} & k_{1x} & k_{1y} & k_{1z} & k_{1xy} & k_{1xz} & k_{1yz} & k_{1xyz} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{40} & k_{4x} & k_{4y} & k_{4z} & k_{4xy} & k_{4xz} & k_{4yz} & k_{4xyz} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Введем в рассмотрение матрицу факторов, которыми являются внутренние деформации (3), а также матрицу откликов, которыми являются отклонения по толщине от среднего значения, по-

лученные по результатам натурального эксперимента по выращиванию колец (4).

$$E = (1 \ e_x \ e_y \ e_z \ e_x e_y \ e_x e_z \ e_y e_z \ e_x e_y e_z); \quad (3)$$

$$\Lambda = (\delta_1 \ \delta_2 \ \delta_3 \ \delta_4). \quad (4)$$

В этом случае истинными значениями внутренних деформаций являются значения следующего выражения

$$e_r = (e_x \ e_y \ e_z), \quad (5)$$

которые являются решением системы нелинейных уравнений:

$$\Phi = (K \cdot E^T - \Lambda^T) (K \cdot E^T - \Lambda^T)^T = (0 \ 0 \ 0 \ 0)^T. \quad (6)$$

Квадратичная форма Φ по своей сути является реализацией метода наименьших квадратов:

$$(e_x \ e_y \ e_z)_r = \text{Arg min} \left[\delta(e_x, e_y, e_z)_i - \delta_i \right]^2. \quad (7)$$

$$\begin{matrix} e_{xi} \leq e_x \leq e_{xu} \\ e_{yi} \leq e_y \leq e_{yu} \\ e_{zi} \leq e_z \leq e_{zu} \end{matrix}$$

Решение системы уравнений $\Phi = 0$ (8) было найдено в MATLAB с помощью решателя lsqnonlin, который реализует алгоритм (2):

$$\min \|f(x)\|_2^2 = \min [f_1(x)^2 + f_2(x)^2 + \dots + f_n(x)^2], \quad (8)$$

$$\text{где } f(x) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ \vdots \\ f_n(x) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

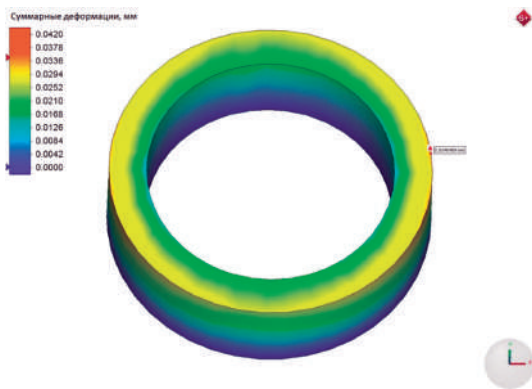


Рис. 6. Суммарное смещение в процессе наплавления на одном из виртуальных экспериментов

Таблица 6

Регрессионный анализ для измеренных колец

| № кольца | K_0 | K_x | K_y | K_z | K_{xy} | K_{xz} | K_{yz} | K_{xyz} | R |
|----------|--------|--------|---------|--------|----------|----------|----------|-----------|-------|
| 1 | -0,01 | 0,00 | -6,99 | -0,60 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 50929,02 | 0,90 |
| | -0,03 | 0,00 | 0,00 | -1,01 | 1599,12 | 0,00 | 0,00 | 82596,39 | 0,76 |
| | -0,05 | -7,04 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 378,19 | 82401,41 | 0,73 |
| | 0 | 13 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | -1289 | -256704 | 0,95 |
| 2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -1602,5 | -125,6 | 0,0 | -85231,0 | 0,8 |
| | 0,0366 | 0,0000 | 22,3889 | 1,9664 | 0,0000 | 0,0000 | 987,8701 | 0,0000 | 0,85 |
| | -0,023 | -4,122 | 0,000 | 0,000 | -928,722 | -41,263 | 0,000 | 0,000 | 0,85 |
| | -0,07 | 0,00 | -44,15 | -3,78 | 0,00 | 0,00 | -1821,71 | 0,00 | 0,73 |
| 3 | 0,057 | 0,000 | 24,460 | 3,029 | 0,000 | 0,000 | 1345,913 | 0,000 | 0,77 |
| | -0,002 | 4,379 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 235,681 | -172,829 | 0,000 | 0,940 |
| | -0,13 | 0,00 | -40,00 | -6,39 | 0,00 | 0,00 | -2378,28 | 0,00 | 0,92 |
| | 0,156 | - | 59,537 | 6,795 | 0,000 | 0,000 | 2723,318 | 0,000 | 0,880 |

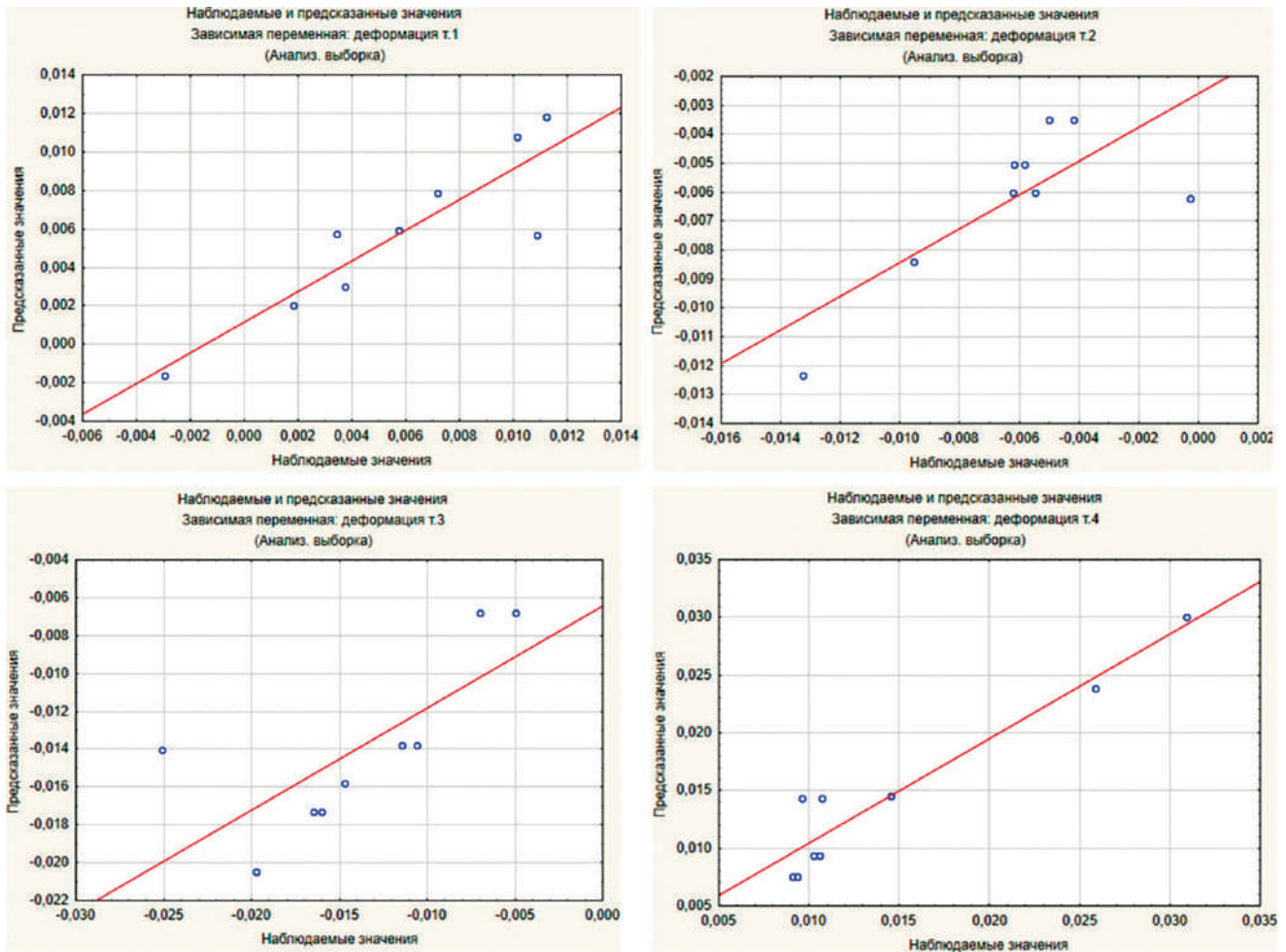


Рис. 7. График сопоставления наблюдаемых деформаций в 4-х точках контроля и их предсказанных значений

При решении использовался вектор начальных приближений

$$e_0 = (e_x \ e_y \ e_z)_0 = (-0,0052043 \ -0,0023375 \ -0,021733) \quad (10)$$

и векторы ограничений:

– для нижней границы

$$e_{\min} = (e_x \ e_y \ e_z)_{\min} = (-0,003643 \ -0,00163363 \ -0,0152131); \quad (11)$$

– для верхней границы

$$e_{\max} = (e_x \ e_y \ e_z)_{\max} = (-0,0067655 \ -0,00303388 \ -0,0282529). \quad (12)$$

Результаты расчета внутренних деформаций для колец 1, 2, 3 приведены в выражении

$$\begin{aligned} e_{r1} &= (e_x \ e_y \ e_z)_{r1} = (-00677 \ -00303 \ -01521); \\ e_{r2} &= (e_x \ e_y \ e_z)_{r2} = (-00364 \ -002995 \ -01521); \\ e_{r3} &= (e_x \ e_y \ e_z)_{r3} = (-00677 \ -00200 \ -01521). \end{aligned} \quad (13)$$

Обсуждение результатов экспериментов

Решение системы нелинейных уравнений $\Phi = 0$ (6) для расчета значений внутренних деформаций по алгоритму `lsqnonlin` в MATLAB имеет хорошую сходимость – не более 10 итераций. Характерный график сходимости решений в зависимости от количества итераций приведен на рис. 8.

В результате без учета выбросов по рассчитанным значениям внутренних деформаций для 3-х колец, получаем усредненный вектор внутренних деформаций, который принимается как результат калибровки:

$$e_r = (e_x \ e_y \ e_z) = (-0,00677 \ -0,003 \ -0,01521). \quad (14)$$

Следует отметить, что в аддитивном процессе нельзя пренебрегать упругой деформацией, как в модели традиционного сварочного процесса. Рассмотрим это отличие более подробно. Каждый проход, формирующий слой, состоит из цикла нагрева и охлаждения. Благодаря этому тепловому циклу в выращиваемой заготовке возникает деформация.

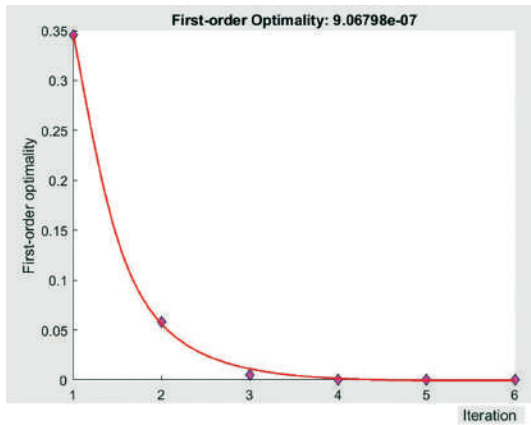


Рис. 8. Сходимость решений нелинейных уравнений расчета значений внутренних деформаций

Генерируемая механическая деформация сильно локализована в этой точке. Эти два состояния связаны с формированием деформации в локализованных точках вследствие процесса плавления и затвердевания [17, 18]. Кроме того, в каждом новом добавленном слое возникают напряжения от ранее наплавленных слоев. После добавления нескольких новых слоев, предыдущий слой переходит в устойчивое твердое состояние и подвергается воздействию упругих деформаций от верхних слоев. По мере выращивания заготовки это воздействие меняется с изменением теплонапряженного состояния. В целом, наплавление материала можно разделить на три этапа: начальное наплавление, промежуточное наплавление, и стационарное состояние. Первоначальное наплавление – это наплавление первого слоя материала на подложку. Промежуточное наплавление – это состояние, когда источник тепла перемещается в следующую точку для наплавления нового слоя. Стационарное состояние – состояние, при котором вся заготовка охлаждается до температуры окружающей среды. Промежуточное состояние является прямым результатом процесса затвердевания. Таким образом, традиционная теория внутренней деформации, разработанная для сварочных процессов применительно к процессу аддитивного производства из-за многослойного эффекта может давать существенную погрешность [13]. Чтобы уйти от этой погрешности, необходимо, согласно модифицированному методу внутренних деформаций [19, 20], заменить деформацию, вызванную термическим циклом, на тензор внутренних деформаций для каждого слоя, который уравнивает возникающие напряжения.

При моделировании аддитивного процесса напряжения температура и смещение определенной точки в слое зависят от количества нанесенных

ранее слоев. С целью уменьшения времени прогнозирования деформаций в конечно-элементном анализе в механической постановке задачи используется техника послойного зарождения и уничтожения конечных элементов. Процесс послойного зарождения и уничтожения элементов показан на рис. 9.

При использовании этого метода на первоначальном этапе все элементы деактивированы. Элементы активируются слой за слоем в направлении выращивания детали. Свои значения внутренних деформаций накладываются на каждый активированный слой или несколько слоев [19, 20]. Для определения внутренних деформаций группы слоев в рамках разработанного метода калибровки достаточно выращивать кольца разной высоты.

Заключение

Результаты моделирования показывают, что метод внутренней деформации является жизнеспособным альтернативным методом моделирования для замены дорогостоящего термомеханического моделирования, требующего значительных вычислительных ресурсов. Метод моделирования внутренней деформации значительно сокращает время расчета с нескольких дней до нескольких часов.

Термическое граничное условие оказывает значительное влияние на точность результатов калибровки, поскольку моделирование с реалистичным граничным условием повышает точность результатов калибровки.

Результаты моделирования показывают, что встроенная методология сводит к минимуму потребность в дорогостоящем вычислительном термомеханическом моделировании и сокращает время вычислений. Метод внутренней деформации можно использовать для обеспечения технологичности и качества продукта на более ранней стадии разработки продукта. Более быстрый и точный способ прогнозирования деформации и напряжений сокращает цикл разработки продукта для аддитивного производства.

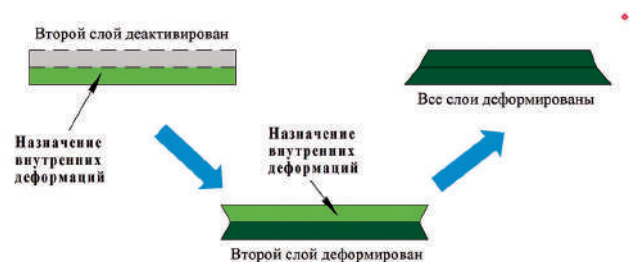


Рис. 9. Иллюстрация метода послойного назначения внутренней деформации

Выводы

1. Разработан новый метод калибровки САЕ-системы для расчетов компенсации искажения геометрии выращиваемой заготовки от действия остаточных напряжений, сочетающий натуральный и виртуальный эксперимент. Отличительной особенностью метода является применение кольцевых образцов конструктивно подобных осесимметричным деталям, при выращивании которых используется технология формирования треков по эквидистанте. Это не исключает возможность применения метода к другим изделиям, которые также являются осесимметричными и могут быть обработаны с использованием этой технологии.

2. Апробация метода калибровки ПЛВ с использованием кольцевых образцов из МПК ЭП648 позволила получить значения внутренних деформаций, которые могут быть в дальнейшем применены при расчете искажений геометрии изделий в САЕ-системах по ускоренному «механическому» методу.

Список источников

1. Олейник М.А., Балякин А.В., Скуратов Д.Л., Петров И.Н., Мешков А.А. Влияние режимов прямого лазерного выращивания на формообразование одиночных валочков и стенок из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 4. С. 243–255. DOI: 10.34759/vst-2022-4-243-255
2. Балякин А.В., Скуратов Д.Л., Хаймович А.И., Олейник М.А. Применение прямого лазерного сплавления металлических порошков из жаропрочных сплавов в двигателестроении // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 3. С. 202–217. DOI: 10.34759/vst-2021-3-202-217
3. Маликов А.Г., Гольшев А.А., Витошкин И.Е. Современные тенденции лазерной сварки и аддитивных технологий (обзор) // Прикладная механика и техническая физика. 2023. Т. 64. № 1. С. 36–59. DOI: 10.15372/pmtf202215159
4. Moat R.J., Pinkerton A., Hughes D. et al. Stress distributions in multilayer laser deposited Waspaloy parts measured using neutron diffraction // 26th International Congress on Applications of Lasers and Electro-optics (ICALEO, 29 October - 1 November 2007). DOI: 10.2351/1.5060984
5. Ерофеев В.А., Логвинов Р.В., Нестеренков В.М. Особенности использования эквивалентного источника теплоты при учете деформаций и напряжений в процессе электронно-лучевой сварки // Сварка и диагностика. 2010. № 4. С. 22–26.
6. Потапов С.Д., Перепелица Д.Д. Исследование влияния остаточных напряжений в зоне расположения трещины на скорость ее роста при циклическом нагружении // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. № 1. С. 104–110.
7. Liu F., Lin X., Yang G. et al. Microstructure and residual

- stress of laser rapid formed Inconel 718 nickel-base superalloy // Optics & laser technology. 2011. Vol. 43. No. 1, pp. 208–213. DOI:10.1016/j.optlastec.2010.06.015
8. Shamsaei N., Yadollahi A., Bian L., Thompson S.M. An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part II: Mechanical behavior, process parameter optimization and control // Additive Manufacturing. 2015. Vol. 8, pp. 12–35. DOI: 10.1016/j.addma.2015.07.002
 9. Петров М. А., Матвеев А. Г., Петров П. А., Сапрыкин Б. Ю. Расчет и анализ процессов объемной штамповки с вращающимся инструментом при помощи конечно-элементного моделирования // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 1. С. 226–244. DOI: 10.34759/vst-2022-1-226-244
 10. Khaimovich A., Balyakin A., Oleynik M. et al. Optimization of Process Parameters for Powder Bed Fusion Additive Manufacturing Using a Linear Programming Method: A Conceptual Framework // Metals. 2022. Vol. 12. No. 11: 1976. DOI: 10.3390/met12111976
 11. Labudovic M.A., Hu M.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. DOI: 10.1023/A:1021153513925
 12. Pratt P., Felicelli S.D., Wang L., Hubbard C. Residual stress measurement of laser-engineered net shaping AISI 410 thin plates using neutron diffraction // Metallurgical and Materials Transactions A. 2008. Vol. 39. No. 13, pp. 3155–3163. DOI: 10.1007/s11661-008-9660-9
 13. Ueda Y., Murakawa H., Ma N. Welding Deformation and Residual Stress Prevention. - Elsevier, Butterworth-Heinemann, 2012. – 312 p. DOI: 10.1016/C2011-0-06199-9
 14. Wang L., Felicelli S.D., Pratt P. Residual stresses in LENS-deposited AISI 410 stainless steel plates // Materials Science and Engineering: A. 2008. Vol. 496. Nos. 1–2, pp. 234–241. DOI: 10.1016/j.msea.2008.05.044
 15. Setien I., Chiumenti M., van der Veen S. et al. Empirical methodology to determine inherent strains in additive manufacturing // Computers & Mathematics with Applications. 2019. Vol. 78. No. 7, pp. 2282–2295. DOI:10.1016/j.camwa.2018.05.015
 16. Vrancken B. Study of residual stresses in selective laser melting. PhD Thesis. Belgium, Katholieke Universiteit Leuven, 2016.
 17. Liang X., Cheng L., Chen Q., Yang Q. A modified method for estimating inherent strains from detailed process simulation for fast residual distortion prediction of single-walled structures fabricated by directed energy deposition // Additive Manufacturing. 2018. Vol. 23. No. 2, pp. 471–486. DOI: 10.1016/j.addma.2018.08.029
 18. Chen Q., Liang X., Hayduke D. An inherent strain based multiscale modeling framework for simulating part-scale residual deformation for direct metal laser sintering // Additive Manufacturing. 2019. Vol. 28, pp. 406–418. DOI: 10.1016/j.addma.2019.05.021

19. Keller N., Ploshikhin V. New method for fast predictions of residual stress and distortion of AM parts // 25th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium (SFF, 4-6 August 2014; Austin, Texas). Vol. 25, pp. 1229-1237.
20. Liang X., Cheng L., Chen Q. et al. A modified method for

estimating inherent strains from detailed process simulation for fast residual distortion prediction of single-walled structures fabricated by directed energy deposition // Additive Manufacturing. 2018. Vol. 23. No. 2. DOI: 10.1016/j.addma.2018.08.029

References

1. Oleinik M.A., Balyakin A.V., Skuratov D.L., Petrov I.N., Meshkov A.A. The effect of direct laser beam energy deposition modes on single rollers and walls shaping from the HN50VMTUB heat resisting alloy. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 4, pp. 243-255. DOI: 10.34759/vst-2022-4-243-255
2. Balyakin A.V., Skuratov D.L., Khaimovich A.I., Oleinik M.A. Direct laser fusion application for powders from heat resistant alloys in engine building. *Aerospace MAI Journal*, 2021, vol. 28, no. 3, pp. 202-217. DOI: 10.34759/vst-2021-3-202-217
3. Malikov A.G., Golyshov A.A., Vitoshkin I.E. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, 2023, vol. 64, no. 1, pp. 36-59. DOI: 10.15372/pmtf202215159
4. Moat R.J., Pinkerton A., Hughes D. et al. Stress distributions in multilayer laser deposited Waspaloy parts measured using neutron diffraction. *26th International Congress on Applications of Lasers and Electro-optics (ICALEO, 29 October - 1 November 2007)*. DOI: 10.2351/1.5060984
5. Erofeev V.A., Logvinov R.V., Nesterenkov V.M. *Svarka i diagnostika*, 2010, no. 4, pp. 22-26.
6. Potapov S.D., Perepelitsa D.D. Research of influence of residual tension in the zone of the arrangement of the crack on the rate of its growth at cyclic loading *Aerospace MAI Journal*, 2014, vol. 21, no. 1, pp. 104-110.
7. Liu F., Lin X., Yang G. et al. Microstructure and residual stress of laser rapid formed Inconel 718 nickel-base superalloy. *Optics & laser technology*, 2011, vol. 43, no. 1, pp. 208-213. DOI: 10.1016/j.optlastec.2010.06.015
8. Shamsaei N., Yadollahi A., Bian L., Thompson S.M. An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part II: Mechanical behavior, process parameter optimization and control. *Additive Manufacturing*, 2015, vol. 8, pp. 12-35. DOI: 10.1016/j.addma.2015.07.002
9. Petrov M.A., Matveev A.G., Petrov P.A., Saprykin B.Y. Computation and analyzing bulk forming processes with a rotating tool using FE simulation. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no 1, pp. 226-244. DOI: 10.34759/vst-2022-1-226-244
10. Khaimovich A., Balaykin A., Oleynik M. et al. Optimization of Process Parameters for Powder Bed Fusion Additive Manufacturing Using a Linear Programming Method: A Conceptual Framework. *Metals*, 2022, vol. 12, no. 11: 1976. DOI: 10.3390/met12111976
11. Labudovic M.A., Hu M.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. DOI: 10.1023/A:1021153513925
12. Pratt P., Felicelli S.D., Wang L., Hubbard C. Residual stress measurement of laser-engineered net shaping AISI 410 thin plates using neutron diffraction. *Metallurgical and Materials Transactions: A*, 2008, vol. 39, no. 13, pp. 3155-3163. DOI: 10.1007/s11661-008-9660-9
13. Ueda Y., Murakawa H., Ma N. *Welding Deformation and Residual Stress Prevention*. Elsevier, Butterworth-Heinemann, 2012, 312 p. DOI: 10.1016/C2011-0-06199-9
14. Wang L., Felicelli S.D., Pratt P. Residual stresses in LENS-deposited AISI 410 stainless steel plates. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, vol. 496, nos. 1-2, pp. 234-241. DOI: 10.1016/j.msea.2008.05.044
15. Setien I., Chiumenti M., van der Veen S. et al. Empirical methodology to determine inherent strains in additive manufacturing. *Computers & Mathematics with Applications*, 2019, vol. 78, no. 7, pp. 2282-2295. DOI: 10.1016/j.camwa.2018.05.015
16. Vrancken B. *Study of residual stresses in selective laser melting*. PhD Thesis. Belgium, Katholieke Universiteit Leuven, 2016.
17. Liang X., Cheng L., Chen Q., Yang Q. A modified method for estimating inherent strains from detailed process simulation for fast residual distortion prediction of single-walled structures fabricated by directed energy deposition. *Additive Manufacturing*, 2018, vol. 23, no. 2, pp. 471-486. DOI: 10.1016/j.addma.2018.08.029
18. Chen Q., Liang X., Hayduke D. An inherent strain based multiscale modeling framework for simulating part-scale residual deformation for direct metal laser sintering. *Additive Manufacturing*, 2019, vol. 28, pp. 406-418. DOI: 10.1016/j.addma.2019.05.021
19. Keller N., Ploshikhin V. New method for fast predictions of residual stress and distortion of AM parts. *25th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium (SFF, 4-6 August 2014; Austin, Texas)*. Vol. 25, pp. 1229-1237.
20. Liang X., Cheng L., Chen Q. et al. A modified method for estimating inherent strains from detailed process simulation for fast residual distortion prediction of single-walled structures fabricated by directed energy deposition. *Additive Manufacturing*, 2018, vol. 23, no. 2. DOI: 10.1016/j.addma.2018.08.029

Статья поступила в редакцию 27.09.2023; одобрена после рецензирования 29.11.2023; принята к публикации 29.11.2023.

The article was submitted on 27.09.2023; approved after reviewing on 29.11.2023; accepted for publication on 29.11.2023.