

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. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.4.11

Smetannikov O.Yu., Trushnikov D.N., Maksimov P.V., Bartolomey M.L., Kovyazin A.V. Modeling of the termomechanical behavior of the product during process of 3D deposition of wire materials in ANSYS. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2017, no. 4, pp. 154-172. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.4.11



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 4, 2017

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI 10.15593/perm.mech/2017.4.11

УДК 539.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ В ANSYS ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ИЗДЕЛИЯ В ПРОЦЕССЕ 3D-НАПЛАВКИ ПРОВОЛОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

О.Ю. Сметанников, Д.Н. Трушников, П.В. Максимов,
М.Л. Бартоломей, А.В. Ковязин

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 16 ноября 2017 г.
Принята: 10 декабря 2017 г.
Опубликована: 29 декабря 2017 г.

Ключевые слова:

аддитивное производство, аддитивные технологии, наплавка, плавление проволоки, численный анализ, конечно-элементное моделирование, определяющие соотношения, механические свойства, термомеханические характеристики.

АННОТАЦИЯ

Аддитивные технологии позволяют изготавливать изделия за счет послойного синтеза и таким образом получать изделия сложной формы. Задача численного моделирования физического процесса изготовления деталей с помощью аддитивных технологий является комплексной и должна учитывать различные термомеханические процессы, что неразрывно связано с широким использованием конечно-элементного компьютерного моделирования средствами специализированных программных комплексов, реализующих математические модели процессов. В работе рассматривается разработанный и реализованный в пакете ANSYS алгоритм расчета нестационарных температурных полей и напряженно-деформированного состояния конструкции в процессе ее создания 3D-наплавкой проволочных материалов. Проводится верификация разработанного численного алгоритма решения трехмерной задачи производства металлических изделий с использованием дуговой наплавки проволочных материалов с результатами эксперимента. Задача разделена на краевую задачу теплопроводности и краевую задачу термомеханики о напряженно-деформированном состоянии, которые являются несвязанными. Для их решения применяется технология «умерщвления» и последующего «возрождения» части материала (данная технология реализуется в пакете ANSYS). Непрерывное наращивание материала производится дискретно, на каждом шаге расчета, соответствующем «возрождению» очередной подобласти из «мертвых» элементов, решается краевая задача теплопроводности и термомеханики, причем результат решения предыдущего шага служит начальными условиями для последующего. Для описания вязкоупругопластического поведения исследуемого сплава использована модель «Ананд». Идентификация модели «Ананд» для

© Сметанников Олег Юрьевич – доктор технических наук, доцент, e-mail: sou2009@mail.ru
Трушников Дмитрий Николаевич – доктор технических наук, профессор, e-mail: trdimitr@yandex.ru
Максимов Пётр Викторович – кандидат технических наук, доцент, e-mail: pvmperm@mail.ru
Бартоломей Мария Леонидовна – кандидат технических наук, доцент, e-mail: mbartolomey@mail.ru
Ковязин Алексей Вадимович – магистр

Oleg Yu. Smetannikov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: sou2009@mail.ru
Dmitriy N. Trushnikov – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: trdimitr@yandex.ru
Petr V. Maksimov – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: pvmperm@mail.ru
Maria L. Bartolomey – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: mbartolomey@mail.ru
Aleksi V. Kovyazin – Master



исследуемого материала проводилась по данным эксперимента на растяжение с заданной скоростью при различных температурах. Данные, полученные из расчетов по разработанной численной модели, хорошо согласуются с экспериментом.

© ПНИПУ

MODELING OF THE PRODUCT TERMOMECHANICAL BEHAVIOR DURING 3D DEPOSITION OF WIRE MATERIALS IN ANSYS

O.Yu. Smetannikov, D.N. Trushnikov, P.V. Maksimov,
M.L. Bartolomey, A.V. Kovyazin

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 16 November 2017
Accepted: 10 December 2017
Published: 29 December 2017

Keywords:

additive manufacturing, additive technologies, deposition, wire deposition, numerical analysis, finite-element modeling, constitutive relations, mechanical properties, termomechanical behavior.

ABSTRACT

Additive technologies allow to produce products due to the layer-by-layer synthesis and obtain products of a complex shape. The numerical modeling of the physical process of manufacturing parts using additive technologies is complex and needs to consider a variety of thermomechanical behavior. This is connected to the extensive use of the finite element computer simulation by means of specialized software packages that implement mathematical models of the processes. The paper considers the algorithm of calculating nonstationary temperature fields and stress-strain state of the structure during the 3D deposition of wire materials developed and implemented in ANSYS. The verification of the developed numerical algorithm is carried out to solve the three-dimensional problem related to the production of metal products using arc 3D deposition of wire materials with the results of the experiment. The problem is divided into the boundary value problem of nonstationary heat conductivity and thermomechanics boundary value problem of stress-strain state that are uncoupled. For its solution the technology of "killing" and subsequent "birthing" is used (it is realized in ANSYS). Continuous building of the material is made discretely on each step of calculation corresponding to "birthing" of the next subarea from "dead" elements, the boundary problem of heat conductivity and thermomechanics is solved. And the result of solving the previous step is the entry conditions for the next step. The Anand's model is used for the description of the viscoelastoplastic behavior of the studied alloy. Identification of the Anand's model for the studied material was carried out according to the stretching experiment with the set speed at various temperatures. The data obtained from the calculations on the developed numerical model are in good agreement with the experiment.

© PNRPU

Введение

Технологии аддитивного производства предоставляют широкий спектр для научно-технических исследований [1–4]. Аддитивное производство позволяет создавать цельные трехмерные объекты практически любой геометрической формы.

Большинство существующих в настоящее время аддитивных технологий изготовления металлических изделий основаны на их использовании в качестве исходного материала для формирования изделий порошковых систем [4–8]. При этом существенно сужается круг конструкционных материалов, из которых возможно получение готовых изделий высокого качества. В частности, формирование изделий из большинства алюминиевых сплавов, а также сплавов активных металлов, таких как титановые и магниевые сплавы, приводит к повышенной пористости материала полученного изделия с существенным снижением его механических характеристик [9–12]. Производительность формирования деталей из порошковых материалов в существующих аддитивных технологиях является крайне низкой, что практически исключает перспективы применения этих технологий для производства крупногабаритных изделий. Кроме того, несмотря на использование в этих технологиях оборудования, которое по точности в большинстве

случаев превосходит традиционное оборудование для обработки металла, при порошковой 3D-синтезе точность изготовления изделия оказывается невысокой в связи с усадкой материала, составляющей, по данным исследователей, от 8 до 30 %.

Технология гибридного изготовления изделий объединяет лучшие характеристики аддитивного формирования заготовки и последующего механического удаления материала в процессе создания металлических изделий [13–15]. Процесс может реализовываться на одной платформе с гибридным послойным нанесением проволоочного материала и обработкой с помощью станка с ЧПУ и является оптимальным для изготовления крупногабаритных деталей низкой и средней форм сложности.

Формирование крупногабаритных металлических изделий с использованием оплавления проволоочного материала позволяет избавиться от проблем, связанных с низкой производительностью существующих методов, высокой стоимостью применяемого оборудования, ограниченностью типов применяемых материалов, обусловленной традиционным использованием в качестве исходного материала для аддитивного формирования изделий порошковых систем, оплавляемых мощным тепловым источником [13–14].

Математическое описание процессов, сопровождающих аддитивное производство, представляет собой масштабную мультидисциплинарную проблему, решение которой требует привлечения понятий, законов и методов теории тепломассообмена, материаловедения, металлургии, термомеханики и других наук. Как элемент современного интеллектуального цифрового производства, аддитивные технологии неразрывно связаны с широким использованием конечно-элементного компьютерного моделирования средствами специализированных программных комплексов, реализующих математические модели процессов.

Процесс изготовления детали методом аддитивного производства сопровождается сложными термомеханическими явлениями, приводящими к формированию полей технологических остаточных напряжений и возможному короблению детали [16–23]. Причина появления внутренних напряжений в выращиваемом объекте связана с существенным пространственно-временным неоднородным распределением температурно-конверсионных полей. Механизм возникновения остаточных напряжений вызван несовместностью неупругих деформаций [24], в первую очередь деформаций температурной усадки при охлаждении, структурной усадки вследствие протекания фазовых превращений (кристаллизации расплава), отличающейся деформационной историей различных точек материала из-за неоднородности температур, температурных градиентов и скоростей температур.

Зачастую для устранения возникающих при изготовлении современных деталей геометрических дефектов проводят предварительную натурную отработку технологии, выбор определенного расположения детали в установке, технологического режима с целью минимизации дефектов, что является серьезным препятствием для организации полноценного цифрового производства.

Подход, связанный с построением и использованием математических и компьютерных моделей термомеханического поведения детали в процессе аддитивного производства, позволяет без проведения натуральных экспериментов на этапе проектирования параметров технологического процесса и параметров конструкции прогнозировать качественные и количественные характеристики напряженного состояния и коробления будущей детали, а также исследовать эффективность возможных мер по снижению остаточных напряжений и деформаций (термообработка). Известны исследования, направленные на моделирование процессов послойного синтеза [25–28] и оптимизацию термического цикла [29], оценку влияния параметров процессов на изменение формы готового изделия [30].

Возможность моделирования технологического процесса сплавления представляет значительный интерес и является резервом для оптимизации технологических режимов изготовления деталей, разработки управляющих программ, минимизации дефектов и повышения качества изготовления сложных деталей [31–32].

Численное моделирование процесса оплавления проволочного материала рассмотрено в работах [33–34], проводится сравнение с процессом производства методом оплавления для реального образца. Расчеты ведутся методом конечных элементов, осаждение металла моделируется выделением и активацией элементов, для вычислений используется коммерческий продукт Marc и Mentat. Модель учитывает термические и деформационные процессы, наблюдаемые в образце, и данные вычислительного эксперимента хорошо согласуются с натурным экспериментом.

В представленной статье рассмотрены особенности численного моделирования процесса аддитивного наращивания изделий методом сплавления с использованием пакета ANSYS, проведен анализ возможностей этой широко применяемой в ПНИПУ программы для заявленной цели.

1. Объект исследования

Целью данной работы является верификация созданного численного алгоритма решения трехмерной задачи производства металлических изделий с использованием наплавки проволочных материалов. В качестве эталона взяты результаты эксперимента по наплавлению проволоки на металлическую подложку с использованием дуговой наплавки в защитных газах вольфрамовым (неплавящимся) электродом, изложенные в работе [33]. На рис. 1, *а* показана рассматриваемая пластина с размерами 275×100×12 мм. На верхнюю поверхность наплавляется металлическая стенка длиной 165 мм, поперечное сечение которой показано на рис. 1, *б*.

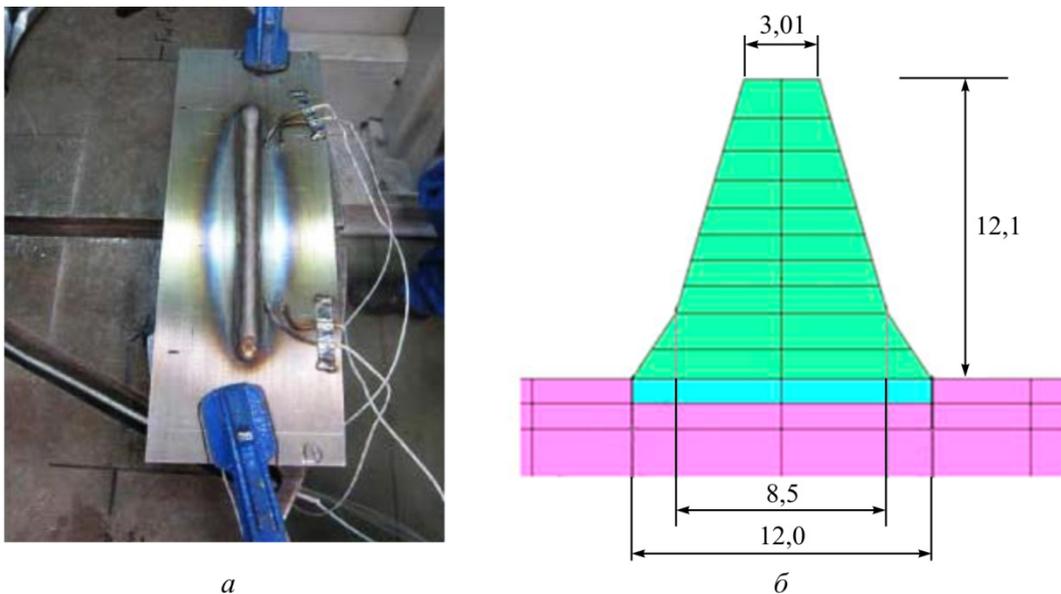


Рис. 1. Общий вид изделия после эксперимента с системой креплений и датчиков (*а*); размеры наплавляемой зоны в сечении, мм (*б*) [33]

Fig. 1. General view of the product after the experiment with the fixing system and sensors (*a*); the dimensions of the weld area in the cross section (*b*) [33]

Процесс дуговой наплавки производится в два этапа. На первом для предварительного разогрева пластины-основания осуществляется проход горелкой туда-обратно со скоростью $v_s = 5$ мм/с и охватом площади, в 1,5 раза превышающей площадь основания наплавляемой стенки. Потребляемая мощность горелки $W = 2,7$ кВт, диаметр пятна $D_s = 6$ мм. Последующая наплавка производится в 10 слоев по непрерывной траектории (на обратном ходе процесс не прерывается). Материал – никелевый сплав Inconel 718 [35].

2. Математическая постановка

Принимая во внимание малость деформаций и пренебрежимо малое диссипативное тепловыделение, можно разделить краевую задачу нестационарной теплопроводности и краевую задачу термомеханики о напряженно-деформированном состоянии (НДС), которые в такой постановке являются несвязанными. Для их решения применяется технология «умерщвления» и последующего «оживления» (Elements Birth and Death в ANSYS) части материала, первоначально в модели отсутствующего, а затем возникающего в процессе наплавки. При этом в качестве расчетной рассматривается область, занимаемая уже готовым изделием. Непрерывное наращивание материала производится дискретно, на каждом подэтапе расчета, соответствующем «оживлению» очередной подобласти из «мертвых» элементов, решается краевая задача теплопроводности и термомеханики, причем результат решения предыдущего подэтапа служит начальными условиями для последующего.

На k -м подэтапе решения постановка краевой задачи нестационарной теплопроводности по определению полей температур $T(\mathbf{x}, t)$ в области V_k с границей S_k с учетом принятых гипотез включает в себя [36]:

уравнение теплопроводности

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

где $c(\mathbf{x}, T)$, $\lambda(\mathbf{x}, T)$, $\rho(\mathbf{x})$ – соответственно теплоемкость, теплопроводность и плотность неоднородно легированного материала; $\dot{q}(\mathbf{x}, t)$ – удельная мощность внешнего источника тепла;

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 (закон Стефана-Больцмана); ε – коэффициент черноты; σ_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 подэтапа; $T_{k-1}(\mathbf{x})$ – температура, определенная на конец предыдущего.

В данных соотношениях учитывается, что на протяжении подэтапа область исследования $V_k = V_k^{liv} \cup V_k^{kil}$ остается неизменной. Здесь через V_k^{liv} и V_k^{kil} обозначены зоны, занимаемые «живыми» и «мертвыми» элементами соответственно. При этом теплофизические свойства материала в зоне «мертвых» элементов подвержены деградации:

$$c(\mathbf{x}), \mathbf{x} \in V_k^{kil} \ll c(\mathbf{x}, T), \mathbf{x} \in V_k^{liv}, \rho(\mathbf{x}), \mathbf{x} \in V_k^{kil} \ll \rho(\mathbf{x}, T), \mathbf{x} \in V_k^{liv}, \\ \lambda(\mathbf{x}), \mathbf{x} \in V_k^{kil} \gg \lambda(\mathbf{x}, T), \mathbf{x} \in V_k^{liv}.$$

Несвязанная квазистатическая краевая задача механики деформируемого твердого тела (МДТТ) с учетом несущественности вклада массовых сил на k -м подэтапе включает [37–38]:
уравнения равновесия

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

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

геометрические соотношения Коши

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

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

граничные условия в перемещениях

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

и напряжениях

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

где S_u, S_σ – части границы с заданными перемещениями и нагрузками соответственно.

Термомеханические параметры материала в зоне «мертвых» элементов исключают физическую нелинейность, являются идеально упругими с деградированными значениями:

$${}^4\hat{C}(\mathbf{x}), \mathbf{x} \in V_k^{kil} \ll {}^4\hat{C}(\mathbf{x}, T), \mathbf{x} \in V_k^{liv},$$

где ${}^4\hat{C}$ – тензор четвертого ранга упругих констант материала.

Общая система уравнений краевой задачи МДТТ включает также определяющие соотношения. Для описания вязкоупругопластического поведения исследуемого сплава использована модель «Ананд» [41], включенная в перечень физических моделей пакета ANSYS. Модель имеет следующий вид:

$$\hat{\sigma} = {}^4\hat{C} \cdot (\hat{\varepsilon} - \hat{\varepsilon}_T - \hat{\varepsilon}_B), \quad (8)$$

$$\hat{\varepsilon}_T(\mathbf{x}, t) = \hat{E} \int_{T_0}^T \alpha(\mathbf{x}, T(\mathbf{x}, t)) dT, \quad (9)$$

где ${}^4\hat{C}$ – тензор четвертого ранга упругих констант материала; $\hat{\varepsilon}_e(\mathbf{x}, t) = \hat{\varepsilon}(\mathbf{x}, t) - \hat{\varepsilon}_T(\mathbf{x}, t) - \hat{\varepsilon}_B(\mathbf{x}, t)$ – тензор упругих деформаций; $\hat{\varepsilon}(\mathbf{x}, t)$ – тензор полных деформаций; $\hat{\varepsilon}_T(\mathbf{x}, t)$ – тензор температурных деформаций; $\hat{\varepsilon}_B(\mathbf{x}, t)$ – тензор вязких деформаций;

$\alpha(\mathbf{x}, T)$ – коэффициент температурного расширения материала; T_0 – температура начала отсчета температурной деформации; \hat{E} – единичный тензор второго ранга. Скорость вязкой деформации вычисляется по формуле

$$\dot{\hat{\epsilon}}_B(\mathbf{x}, t) = \dot{\hat{\epsilon}}_B(\mathbf{x}, t) \left(\frac{3 \hat{s}}{2 q} \right),$$

где $\hat{s}(\mathbf{x}, t) = \hat{\sigma}(\mathbf{x}, t) - \sigma(\mathbf{x}, t) \hat{E}$ – девиатор тензора напряжений; $\sigma(\mathbf{x}, t) = \sigma_{kk} / 3$ – среднее напряжение; q – эквивалентное напряжение, $q = \sqrt{\frac{3}{2} \hat{s} : \hat{s}}$ (символ «:» означает скалярное произведение, ранее введенный символ « \cdot » означает тензорное произведение); $\dot{\hat{\epsilon}}_B = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\hat{\epsilon}}_B : \dot{\hat{\epsilon}}_B}$ – эквивалентная скорость вязкой деформации, связанная с остальными параметрами соотношением

$$\dot{\hat{\epsilon}}_B = A e^{-\frac{U}{RT}} \left[\sinh \left(\xi \frac{\sigma}{S} \right) \right]^m. \quad (10)$$

Модель включает также эволюционное уравнение

$$\dot{S} = \left\{ h_0 (|B|)^a \frac{B}{|B|} \right\} \dot{\hat{\epsilon}}_B, \quad (11)$$

предполагающее возможность деформационного упрочнения и разупрочнения. Здесь $B = 1 - \frac{S}{S^*}$; $S^* = S_1 \left[\frac{\dot{\hat{\epsilon}}_B}{A} e^{\frac{U}{RT}} \right]^n$; σ – интенсивность напряжений; S – сопротивление деформации (скалярная функция упрочнения); S^* – величина насыщения функции упрочнения; R – универсальная газовая постоянная; U – энергия активации; T – абсолютная температура; $A, a, m, n, h_0, \xi, S_1$ – эмпирические коэффициенты.

С учетом особенностей поведения элементов, «оживляемых» по технологии, используемой в ANSYS, соотношения (8) преобразуются к виду

$$\hat{\sigma} = {}^4 \hat{C} \cdot (\hat{\epsilon} - \hat{\epsilon}_T - \hat{\epsilon}_B - \hat{\epsilon}_{k-1}), \quad (12)$$

где $\hat{\epsilon}_{k-1}$ – полная деформация, вычисленная к концу $k-1$ -го подэтапа (актуальное состояние на момент «оживления» элемента является для него естественным).

3. Алгоритм численной реализации

3.1. Решение задачи теплопроводности

Алгоритм, используемый для расчета в конечно-элементном пакете ANSYS температурных полей при численном моделировании процесса электронно-лучевого наплавления, предполагает выполнение следующих расчетных процедур.

1. Создание конечно-элементной модели, включающей разделенные на отдельные горизонтальные слои объемы, занятые будущим изделием, а также платформу-основание с соответствующими теплофизическими свойствами.

2. «Умерщвление» (команда EKILL) части элементов изделия, отсутствующих в реальном процессе наращивания до его начала.

3. В цикле по наращиваемым слоям, начиная с нижнего:

3.1. Задание на верхней границе слоя условий конвективного теплообмена по формуле (2);

3.2. В цикле по подэтапам прохода зон наплавления очередного расчетного слоя:

3.2.1. Удаление на нижней границе части слоя под зоной ранее заданных условий конвективного теплообмена, если таковые имеются;

3.2.2. «Оживление» (команда EALIVE) всех элементов k -й зоны;

3.2.3. Нагрев части элементов зоны распределенным по объему источником тепловой энергии (см. формулу (1)) в течение времени воздействия луча t_a ;

3.2.4. Удаление источника тепла и ожидание в течение временного интервала, равного времени ожидания t_{wi} .

4. Ожидание до полного (частичного) охлаждения системы.

Время воздействия луча t_a с учетом возможного перекрытия траекторий движения горелки вычисляется по формуле

$$t_a = \frac{S_s}{v_s \cdot ds}, \quad (13)$$

где $S_s = \pi D_s^2 / 4$ – площадь пятна; v_s – скорость горелки; ds – расстояние между соседними треками.

Время ожидания $t_{wi,k}$ для k -й зоны наплавления определяется выражением

$$t_{wi} = \frac{S_k}{ds \cdot v_s}, \quad (14)$$

где S_k – площадь зоны.

Удельная мощность тепловыделения на поверхности пятна нагрева наплавленного материала определяется по формуле

$$\tilde{W}_T = K \cdot W / S_s, \quad (15)$$

где W – мощность электронного луча; K – доля мощности, расходуемая на нагрев.

Удельная объемная мощность теплового источника, используемая в уравнении (1), принимает вид

$$\dot{q} = \dot{q}_s \cdot S_k / V_k = \frac{W \cdot K}{S_s \cdot h_k}, \quad (16)$$

где V_k – объем наплавленной зоны; h_k – толщина слоя. Толщина наплавленного слоя h_k задается исходя из наблюдаемой в эксперименте общей высоты наплавленной части изделия и фактического количества слоев.

Теплофизические свойства материала взяты из работы [39]. При этом в соответствии с представленными в статье данными плотность $\rho = 8170$ кг/м³ и теплопроводность $\lambda = 30$ Вт/(м·К) полагались постоянными. Температурная зависимость энтальпии $H(T)$ представлена на рис. 2. Теплоемкость материала, входящая в уравнение теплопроводности (1), вычислялась по формуле $c(T) = dH(T) / dT$. Следует отметить, что перепад на кривой $H(T)$

в диапазоне 1500–1600 К на рис. 2 обусловлен выделением тепла при кристаллизации сплава. Доля мощности луча, расходуемая на нагрев K , в расчете принималась равной 0,2.

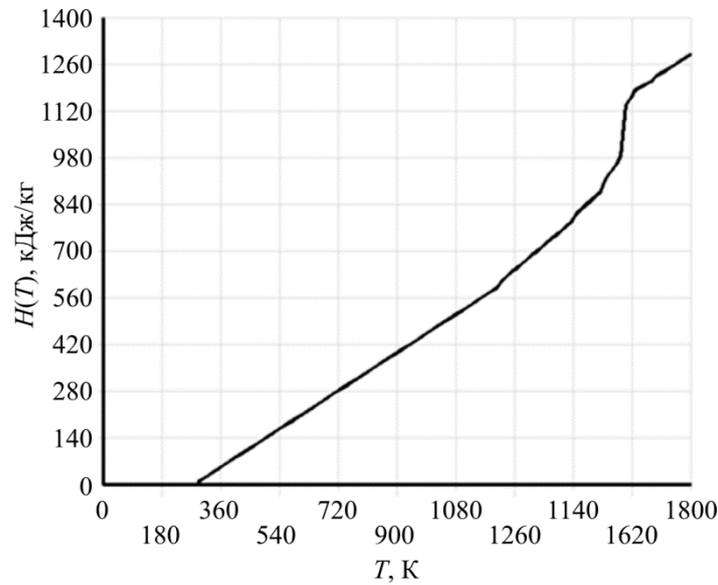


Рис. 2. Зависимость энтальпии $H(T)$, кДж/кг от температуры T , К для сплава Inconel 718
Fig. 2. The dependence of enthalpy $H(T)$, kJ/kg on temperature T , K for alloy Inconel 718

На рис. 3. представлена конечно-элементная модель задачи. При решении использованы 20-узловые изопараметрические элементы Solid279.

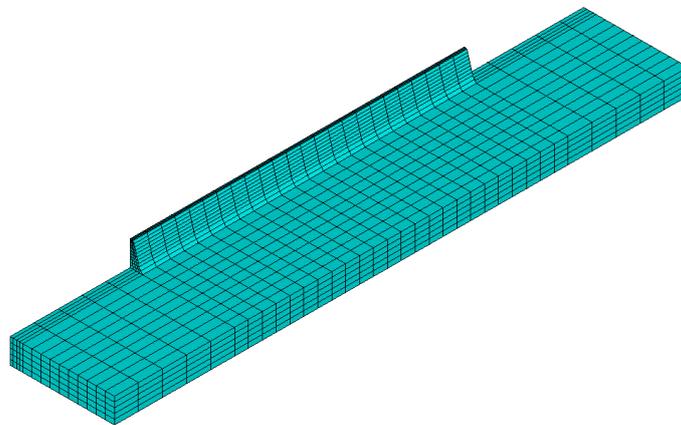


Рис. 3. Дискретная модель задачи о наплавлении
Fig. 3. Discrete model of the problem of deposition

3.2. Решение задачи определения напряженно-деформированного состояния конструкции

Дискретная модель идентична изображенной на рис. 3. Перед началом расчета температурный элемент Solid279 заменяется на Solid286, использующий перемещения в качестве степеней свободы, и добавляются термомеханические свойства. Алгоритм аналогичен приведенному в п. 3.1.

1. «Умерщвление» (команда EKILL) части элементов изделия, отсутствующих в реальном процессе наращивания до его начала. Задание граничных условий в перемещениях (симметричное закрепление по плоскости разреза, закрепление по вертикали в зонах захватов (рис. 1, 5) и в центральном нижнем узле).

2. В цикле по наращиваемым слоям, начиная с нижнего:

3.2. В цикле по подэтапам прохода зон наплавления очередного расчетного слоя:

3.2.1. «Оживление» (команда EALIVE) всех элементов k -й зоны;

3.2.2. Приложение ранее вычисленных для данного момента времени температур к узлам модели в течение времени воздействия луча t_a ;

3.2.3. Приложение ранее вычисленных для момента конца времени ожидания температур и выдержка t_{wi} секунд.

4. Чтение температурного поля для времени частичного охлаждения системы, расчет НДС.

5. Приложение температуры окружающей среды, высвобождение от захватов, расчет НДС.

Идентификация выбранной модели «Ананд» (8)–(11) для исследуемого материала проводилась по данным эксперимента на растяжение с заданной скоростью при различных температурах, представленного в работе [40].

Искомые константы модели определялись в несколько этапов методом Нелдера-Мида в пакете Matlab. При этом минимизировалась относительная невязка между расчетными и экспериментальными значениями напряжений на диаграмме $\sigma - \varepsilon$ (рис. 4).

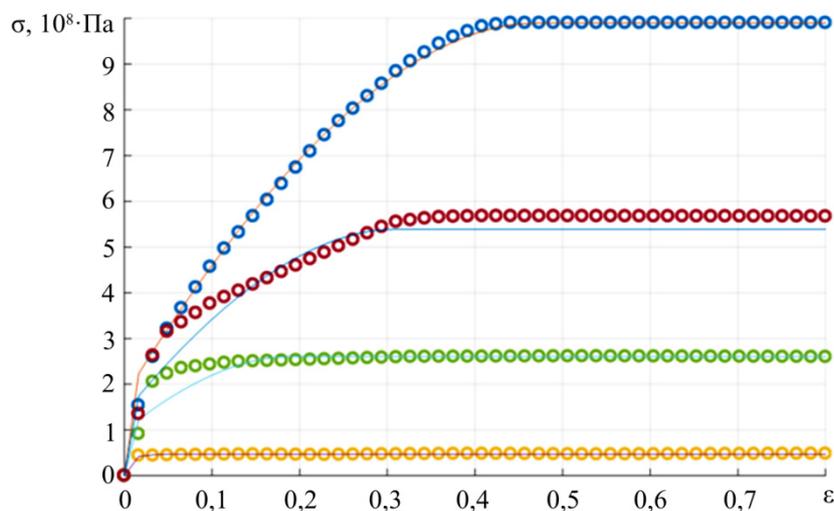


Рис. 4. Сравнение экспериментальных (точки) и расчетных значений напряжений в одноосных испытаниях на растяжение при температурах 720, 850, 900, 1150 °С (сверху-вниз)

Fig. 4. The comparison of experimental (points) and calculated values of stresses in uniaxial tensile tests at temperatures of 720, 850, 900, 1150 °C (from the top down)

В результате найдены следующие значения материальных констант: $S_0 = 2,0447e+05$ Па, $U/R = 2,0864e+03$, $\xi = 0,3335$, $A = 2,5008e+04$, $m = 0,4363$, $h_0 = 4,0352e+06$, $S_1 = 3,2148e+07$ Па, $n = 0,2273$, $a = 0,4461$. Как видно из рис. 4, относительная погрешность расчета не превышает 10 %. Материал полагался изотропным, модуль Юнга и коэффициент Пуассона 153 ГПа и 0,32 соответственно не зависят от температуры.

Среднее значение КЛТР на температурном интервале до температуры солидуса $\alpha = 6,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Линейная усадка на интервале между температурами солидуса и ликвидуса составляет 0,3 % и введена в температурную зависимость $\alpha(T)$. Эффекты упрочнения-разупрочнения, сопровождающие процесс наращивания, заложены в модель «Ананд».

4. Результаты расчета и обсуждение

На рис. 5 показано расположение датчиков температуры в эксперименте из работы [33]. При этом датчики 2, 3, 5, 6 размещались на верхней поверхности пластины-основания, а 1 и 4 – на нижней. Начальное направление движения горелки – справа-налево. На рис. 6–8 представлены графики эволюции температуры в данных точках. Как видно из рисунков, качественно полученные данные хорошо согласуются с экспериментом. Наихудшее количественное совпадение наблюдается в точках на верхней плоскости основания, расположенных близко к зоне нагрева (точки 3 и 5, рис. 8). Кроме того, кривые содержат осцилляции, при этом температура в некоторых точках опускается ниже температуры окружающей среды. В целом экспериментальные графики лежат выше расчетных. Наличие скачков можно объяснить близостью зоны нагрева и связанных с этим больших температурных градиентов, существенно искажающих результат на достаточно грубой (см. рис. 3) сетке. Более высокий уровень нагрева в эксперименте объясняется в том числе неучетом тепловой радиации, исходящей от горелки, распространяющейся далеко за пределы расчетного размера пятна.

В других точках измерения (см. рис. 6, 7) погрешность расчетных данных существенно ниже. Максимальная абсолютная невязка не превышает 15°C .

На рис. 9 в качестве иллюстрации показаны температурные поля на момент завершения предварительного прогрева пластины-основания (см. рис. 9, а) и на момент достижения конца четвертого слоя (рис. 9, б).

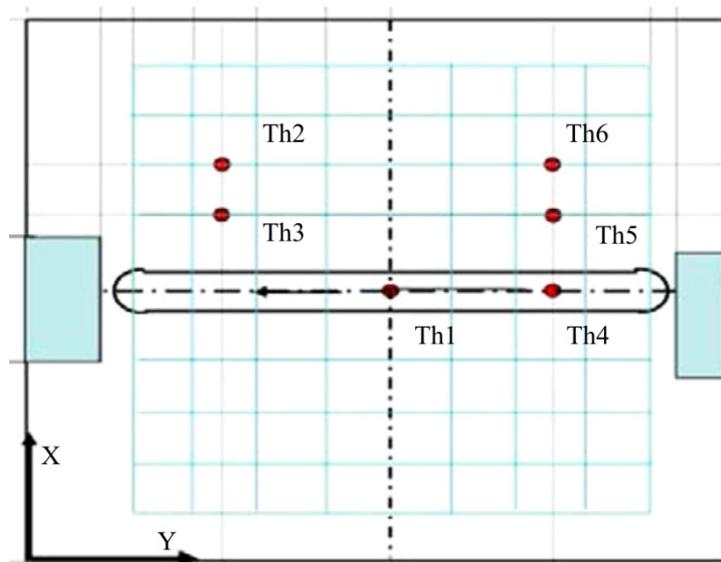


Рис. 5. Схема размещения и нумерация датчиков температуры [33]

Fig. 5. The layout and numbering of temperature sensors [33]

На рис. 10 показаны результаты решения задачи механики деформируемого твердого тела (МДТТ), изображены остаточные перемещения в центральных сечениях пластины.

Из рисунка видно, что остаточное коробление конструкции прогнозируется с приемлемой точностью. Предсказана форма пластины в виде чаши с высотой подъема краев около 1 мм. Наименьшая точность расчета – в поперечном сечении, где относительная невязка подъема достигает 20 %.

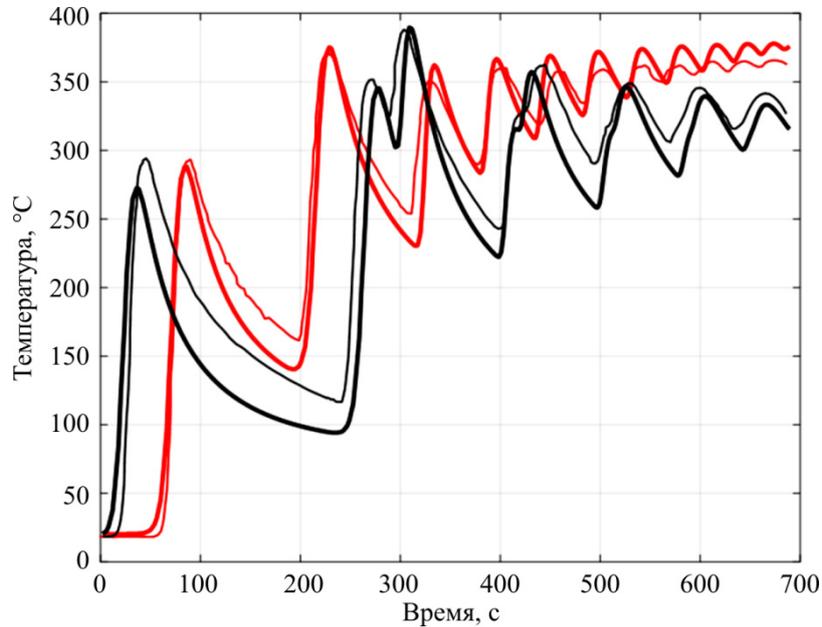


Рис. 6. Температура, °С, в точках 1 (красные линии) и 4 (черные линии).

Тонкие кривые – эксперимент, жирные – расчет

Fig. 6. The temperature (°C) in points 1 (red lines) and 4 (black lines).

Thin curves show the experiment, thick curves show the calculation

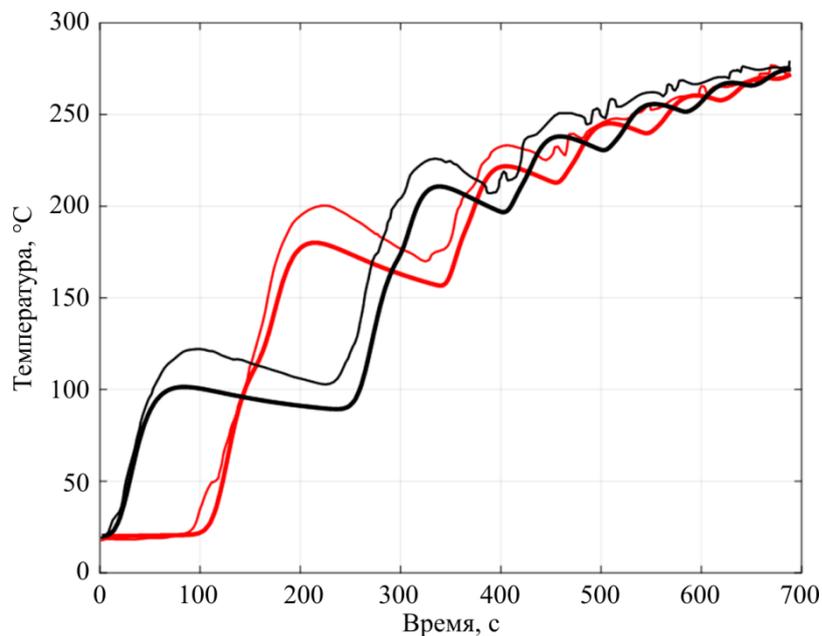


Рис. 7. Температура, °С, в точках 2 (красные линии) и 6 (черные).

Тонкие кривые – эксперимент, жирные – расчет

Fig. 7. The temperature (°C) in points 2 (red lines) and 6 (black lines).

Thin curves show the experiment, thick curves show the calculation

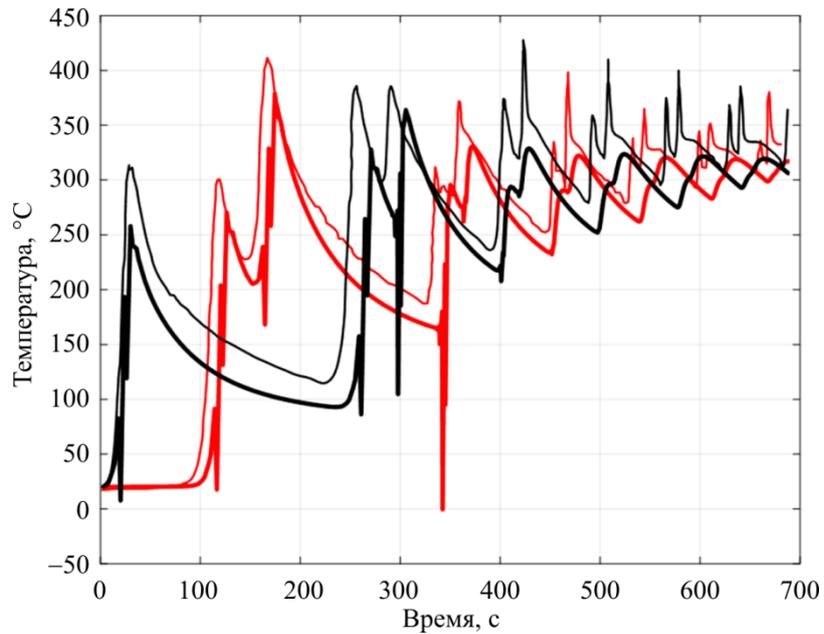


Рис. 8. Температура, °С, в точках 3 (красные линии) и 5 (черные).
Тонкие кривые – эксперимент, жирные – расчет
Fig. 8. The temperature (°C) in points 3 (red lines) and 5 (black lines).
Thin curves show the experiment, thick curves show the calculation

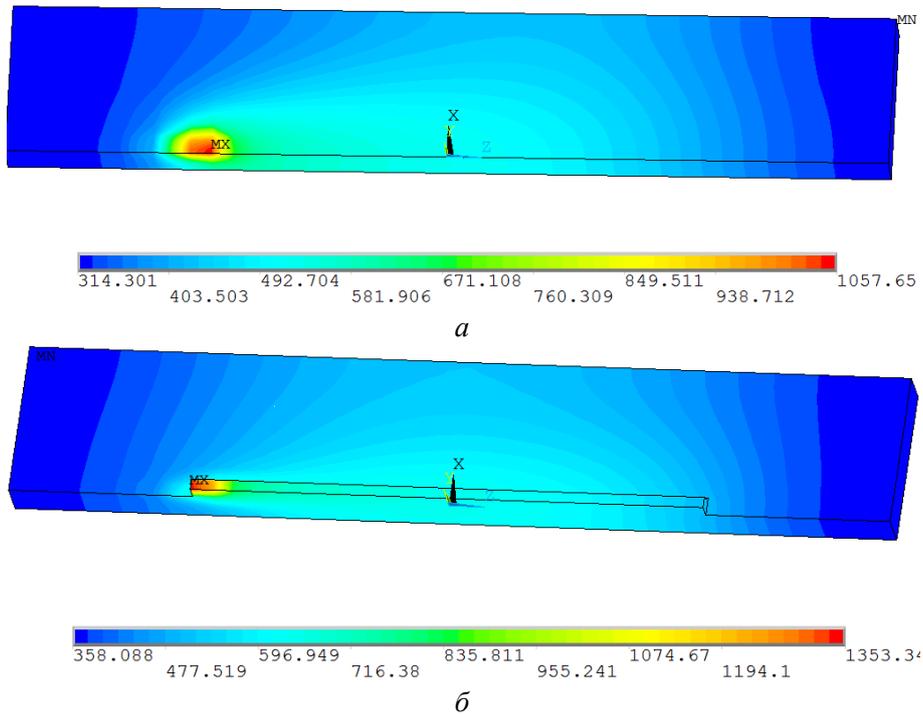


Рис. 9. Распределение температуры, К: (а) $t = 291$ с; (б) $t = 506$ с
Fig. 9. The distribution of temperature, K: (a) $t = 291$ s, (b) $t = 506$ s

На рис. 11 представлена картина распределения остаточных характеристик в конструкции.

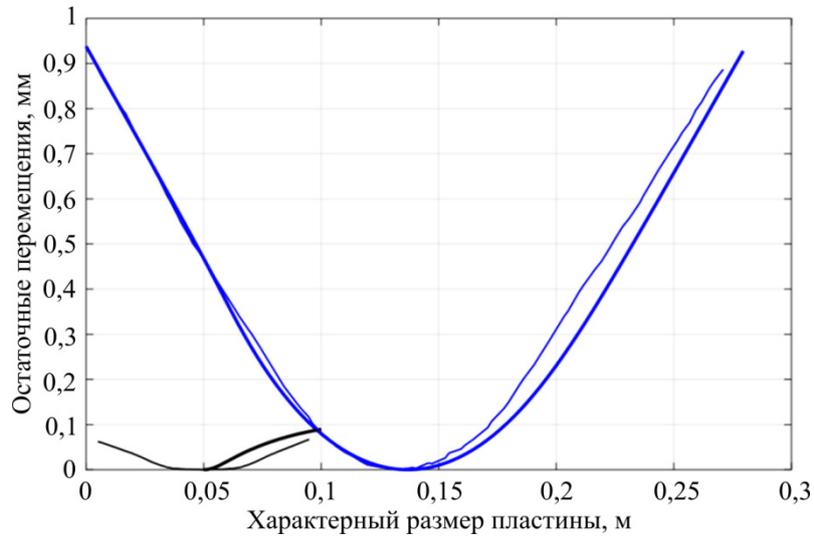


Рис. 10. Относительные остаточные перемещения, мм, в продольном (синие линии) и поперечном (черные) сечениях плиты на нижней поверхности. Тонкие кривые – эксперимент, жирные – расчет
 Fig. 10. Relative residual displacements, mm in the longitudinal (blue lines) and transverse (black lines) sections of a plate on the lower surface. Thin curves show the experiment, thick curves show the calculation

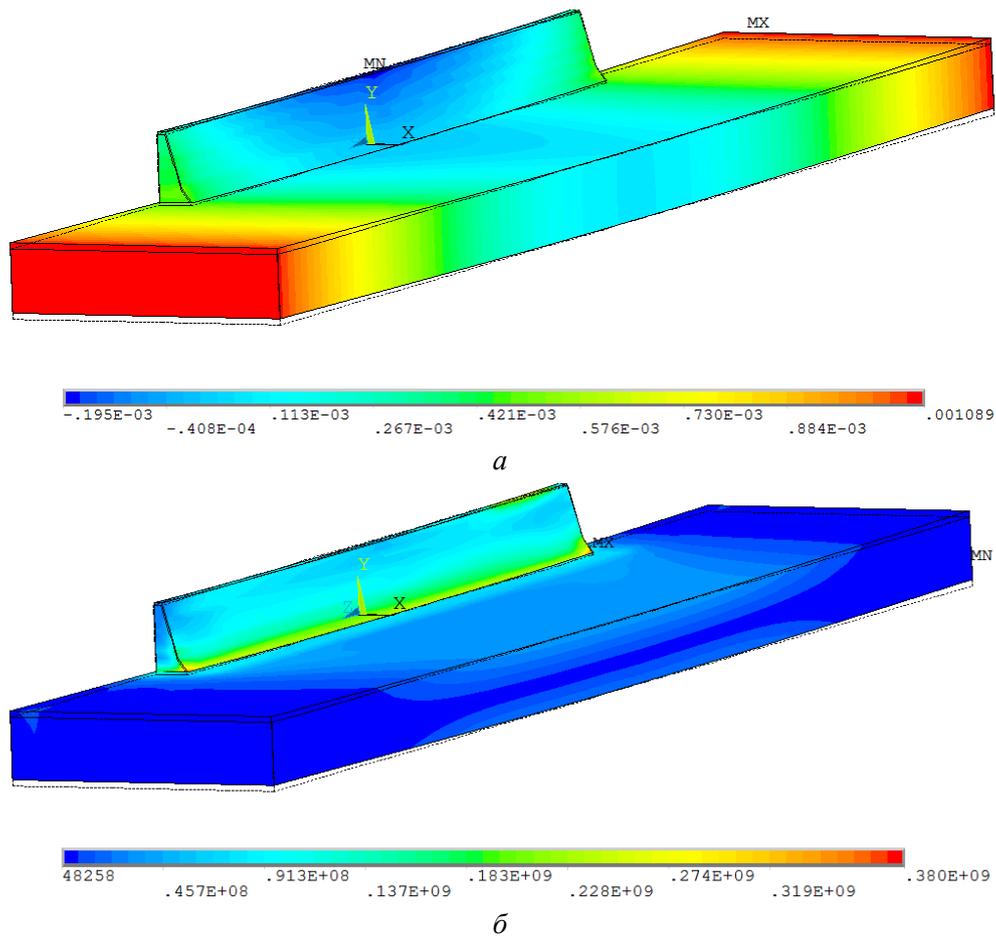


Рис. 11. Вертикальные перемещения в конструкции после остывания и освобождения, м (а);
 интенсивность остаточных напряжений, Па (б)
 Fig. 11. Vertical displacements in the construction after cooling and release, m (a);
 the intensity of residual stresses, Pa (b)

Из рис. 11, *a* видно, что доминирующим является продольный прогиб, поперечный примерно на порядок ниже. Наибольшая интенсивность остаточных напряжений наблюдается в зоне стыка наплавляемого материала с платформой.

Выводы

1. Разработан и реализован в виде программы на APDL пакета ANSYS алгоритм расчета нестационарных температурных полей и напряженно-деформированного состояния конструкции в процессе ее создания дуговой 3D-наплавкой проволочных материалов.

2. По экспериментальным данным других авторов проведена идентификация теплофизических и термомеханических параметров материала – никелевого сплава Inconel 718.

3. Верификация разработанной модели показала приемлемую точность полученных результатов.

4. Для повышения точности определения температуры имеет смысл в дальнейшем усложнить математическую модель процесса, учтя такие факторы, как лучистый перенос тепловой энергии сварочной дуги на поверхность изделия и термоконвекционные явления в зоне расплава.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (RFMEFI58317X0062).

Acknowledgments

The work has been carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (RFMEFI58317X0062).

Библиографический список

1. Elliott J.A. Novel Approaches to Multiscale Modelling in Materials Science // *International Materials Reviews*. – 2011. – Vol. 56. – P. 207–225.

2. Petrick I., Simpson T. 3D Printing Disrupts Manufacturing // *Research-Technology Management*. – November-December. – 2013. – P. 15–16.

3. Environmental Aspects of Laser-Based and Conventional Tool and Die Manufacturing / W.R. Morrow, H. Qi, L. Kim, J. Mazumder, S.J. Skerlos // *J. Clean Prod.* – 2007. – Vol. 15. – P. 932–943.

4. Wray P. Additive Manufacturing: Turning Manufacturing Inside Out // *Amer. Ceram. Soc. Bull.* – 2014. – Vol. 93. – No. 3. – P. 17–23.

5. Freedman D.H. Layer by Layer // *MIT Tech. Rev.* – 2012. – Vol. 115. – No.1. – P. 50–53.

6. Direct metal part forming of 316L stainless steel powder by electron beam selective melting / H.B. Qi, Y.N. Yan, F. Lin, W. He, R.J. Zhang // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. – 2006. – Vol. 220. – No. 11. – P. 1845–1853. DOI: 10.1243/09544054JEM438

7. Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies / L.E. Murr, S. Gaytan, D.A. Ramirez, E. Martinez, J. Hernandez, K.N. Amato, P.W. Shindo, F. Medina, R.B. Wicker // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2012. – Vol. 28. – No. 1. – P. 1–14. DOI: 10.1016/S1005-0302(12)60016-4

8. Frazier W.E. Metal Additive Manufacturing: A Review // J. Mater. Eng. Performance. – 2014. – Vol. 23. – No. 6. – P. 1917–1928.
9. Louvis E., Fox P., Sutcliffe C.J. Selective laser melting of aluminium components // Journal of Materials Processing Technology. – 2011. – Vol. 211. – P. 275–284. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.09.019
10. Capabilities and Performances of the Selective Laser Melting Process / S.L. Campanelli, N. Contuzzi, A. Angelastro, A.D. Ludovico // Polytechnic of Bari, Department of Management and Mechanical Engineering, Viale Japigia, 182 Italy. – URL: http://cdn.intechopen.com/pdfs/12285/InTech-Capabilities_and_performances_of_the_selective_laser_melting_process.pdf (accessed 14 September 2017).
11. Анализ структуры образцов, полученных DMLS- и SLM-методами быстрого прототипирования / Ю.А. Безобразов [и др.] // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении: материалы 6-й Междунар. молод. науч.-практ. конф. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2012. – С. 154–157.
12. On the role of melt flow into the surface structure and porosity development during selective laser melting / C. Qiu, C. Panwisawas, M. Ward, H.C. Basoalto, J.W. Brooks, M.M. Attallah // Acta Materialia. – 2015. – Vol. 96. – No. 1. – P. 72–79. DOI: 10.1016/j.actamat.2015.06.004
13. Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM) – Advantages of Wire AM vs. Powder AM // Sciaky Inc. – URL: <http://additivemanufacturing.com/2015/10/14/electron-beam-additive-manufacturing-ebam-advantages-of-wire-am-vs-powder-am> (accessed 14 September 2017).
14. Jhavar S., Jain N.K., Paul C.P. Development of micro-plasma transferred arc (p-PTA) wire deposition process for additive layer manufacturing applications // Journal of Materials Processing Technology. – 2014. – Vol. 214. – No. 5. – P. 1102–1110.
15. Hybrid Layered Manufacturing using Tungsten Inert Gas Cladding / Sajan Kapil, Fisseha Legesse, Pravin Milind Kulkarni, Joshi Prathmesh, Desai Ankit, K.P. Karunakaran // Progress in Additive Manufacturing. – 2016. – Vol. 1. – No.1. – P. 79–91. DOI: 10.1007/s40964-016-0005-8
16. 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.
17. 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
18. 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.
19. Experimental and Numerical Analysis of Residual Stresses in Additive Layer Manufacturing by Laser Melting of Metal Powders / Ibiye A. Roberts [et al.] // Key Engineering Materials. – 2011. – Vol. 450. – P. 461–465. – URL: <http://www.scientific.net/KEM.450.461> (accessed 14 September 2017). DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.450.461
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. Поздеев А.А., Няшин Ю.И., Трусов П.В. Остаточные напряжения: теория и приложения. – М.: Наука, 1982. – 112 с.

25. New Trajectories in Electron Beam Melting Manufacturing to Reduce Curling Effect / N. Beraud, F. Vignat, F. Villeneuve, R. Dendievel // *Procedia CIRP*. – 2014. – Vol. 17. – P. 738–743. DOI: 10.1016/j.procir.2014.02.038
26. Simulation of the Laser Beam Melting Process – Approaches for an Efficient Modelling of the Beam-material Interaction / C. Seidel, M.F. Zaeh, M. Wunderer, J. Weirather, T.A. Krol, M. Ott // *Procedia CIRP*. – 2014. – Vol. 25. – P. 146–153. DOI: 10.1016/j.procir.2014.10.023
27. Simulation of Laser Beam Melting of Steel Powders using the Three-Dimensional Volume of Fluid Method / F.-J. Giirtler, M. Karg, K.-H. Leitz, M. Schmidt // *Physics Procedia*. – 2013. – Vol. 41. – P. 881–886. DOI: 10.1016/j.phpro.2013.03.162
28. Electron Beam Absorption Algorithms for Electron Beam Melting Processes Simulated by a Three-Dimensional Thermal Free Surface Lattice Boltzmann Method in a Distributed and Parallel Environment / M. Markl, R. Ammer, U. Ljungblad, U. Riide, C. Korner // *Procedia Computer Science*. – 2013. – Vol. 18. – P. 2127–2136. DOI: 10.1016/j.procs.2013.05.383
29. Mohanty S., Hattel J.H. Numerical Model based Reliability Estimation of Selective Laser Melting Proces // *Physics Procedia*. – 2014. – Vol. 56. – P. 379–389. DOI: 10.1016/j.phpro.2014.08.135
30. Computer Aided Optimisation of the Thermal Management During Laser Beam Melting Process / A. Ilin, R. Logvinov, A. Kulikov, A. Prihodovsky, H. Xu, V. Ploshikhin, B. Gunther, F. Bechmann // *Physics Procedia* – 2014. – Vol. 56. – P. 390–399. DOI: 10.1016/j.phpro.2014.08.142
31. Numerical Computation of Component Shape Distortion Manufactured by Selective Laser Melting / L. Papadakis, A. Loizou, J. Risse, J. Schrage // *Procedia CIRP*. – 2014. – Vol. 18. – P. 90–95. DOI: 10.1016/j.procir.2014.06.113
32. Shishkovsky I.V., Volyansky I. Experimental and numerical modelling of function-graded porous filter elements, synthesized by the SLS method // *High Value Manufacturing: Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping: Proceedings of the 6th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*. – Leiria, Portugal, 1–5 October 2013. – P. 55.
33. Shaped Metal Deposition Processes / C. Agelet de Saracibar, A. Lundbäck, M. Chiumenti, M. Cervera // *Encyclopedia of Thermal Stresses*. – Springer Dordrecht, 2014. – P. 4346–4355. DOI: 10.1007/978-94-007-2739-7_808
34. Lundbäck A. Modelling of metal deposition // *Finite Elements in Analysis and Design*. – 2011. – Vol. 47. – P. 1169–1177.
35. Finite element modeling of multi-pass welding and shaped metal deposition processes / M. Chiumenti, M. Cervera, A. Salmi, C. Agelet de Saracibar, N. Dialami, K. Matsui // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. – 2010. – Vol. 199. – P. 2343–2359.
36. Беляев Н.М., Рядно А.А. Методы теории теплопроводности. Ч. 1. – М.: Высшая школа, 1982. – 327 с.
37. Победря Б.Е. Механика композиционных материалов. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984. – 336 с.
38. Победря Б.Е. Численные методы в теории упругости и пластичности. – М.: Изд-во МГУ, 1981. – 343 с.
39. Porosity in cast equiaxed alloy 718 Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives / R.A. Overfelt, V. Sahai, Y.K. Ko, J.T. Berry // *Proceedings of the International Symposium on Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives*. – Pennsylvania, Pittsburg, 1994. – P. 189–200.
40. Mechanical properties of hot deformed Inconel 718 and X750 / A. Nowotnik, P. Pędrak, J. Sieniawski, M. Góral // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. – 2012. – Vol. 50. – Iss. 2. – P. 74–80.
41. Brown S.B., Kim K.H., Anand L. An internal variable constitutive model for hot working of metals // *International Journal of Plasticity*. – 1989. – Vol. 5. – P. 95–130.

References

1. Elliott J.A. Novel Approaches to Multiscale Modelling in Materials Science. *International Materials Reviews*, 2011, vol. 56, pp. 207-225.
2. Petrick I., Simpson T. 3D Printing Disrupts Manufacturing, *Research-Technology Management*, November-December 2013, pp. 15-16.
3. Morrow W.R., Qi H., Kim L., Mazumder J., Skerlos S.J. Environmental Aspects of Laser-Based and Conventional Tool and Die Manufacturing, *J. Clean Prod.*, 2007, vol. 15, pp. 932-943.
4. Wray P. Additive Manufacturing: Turning Manufacturing Inside Out, *Amer. Ceram. Soc. Bull.*, 2014, vol. 93, no.3, pp. 17-23.
5. Freedman D.H. Layer by Layer, *MIT Tech. Rev.*, 2012, vol. 115, no.1, pp. 50-53.
6. Qi, H.B., Yan Y.N., Lin F., He W., Zhang R.J. Direct metal part forming of 316L stainless steel powder by electron beam selective melting, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2006, Vol. 220, no.11, pp. 1845-1853. DOI: 10.1243/09544054JEM438
7. Murr L.E. Gaytan S., Ramirez D.A., Martinez E., Hernandez J., Amato K.N., Shindo P.W., Medina F., Wicker R.B. Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies, *Journal of Materials Science & Technology*, 2012, vol. 28, no. 1, pp. 1-14. DOI: 10.1016/S1005-0302(12)60016-4
8. Frazier W.E. Metal Additive Manufacturing: A Review, *J. Mater. Eng. Performance*, 2014, vol. 23, no.6, pp. 1917-1928.
9. Louvis E., Fox P., Sutcliffe C.J. Selective laser melting of aluminium components, *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, vol. 211, pp. 275-284. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.09.019
10. Campanelli S.L., Contuzzi N., Angelastro A., Ludovico A.D. Capabilities and Performances of the Selective Laser Melting Process, *Polytechnic of Bari, Department of Management and Mechanical Engineering*, Viale Japigia, 182 Italy, available at: http://cdn.intechopen.com/pdfs/12285/InTech-Capabilities_and_performances_of_the_selective_laser_melting_process.pdf
11. Bezobrazov Iu.A., Zlenko M.A., Zotov O.G., Kolbasnikov N.G. Analiz struktury obraztsov, poluchennykh DMLS- i SLM-metodami bystrogo prototipirovaniia [The analysis of the structure of samples obtained by DMLS- and SLM-methods of fast prototyping], *Materialy 6-i Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Innovatsionnye tekhnologii v metallurgii i mashinostroenii»*, Ekaterinburg, 2012, pp. 154-157.
12. Qiu C., Panwisawas C., Ward M., Basoalto H.C., Brooks J.W., Attallah M.M. On the role of melt flow into the surface structure and porosity development during selective laser melting, *Acta Materialia*, 2015, vol. 96, no. 1, pp. 72-79. DOI: 10.1016/j.actamat.2015.06.004.
13. Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM) – Advantages of Wire AM vs. Powder AM // Sciacke Inc., available at: <http://additivemanufacturing.com/2015/10/14/electron-beam-additive-manufacturing-ebam-advantages-of-wire-am-vs-powder-am>
14. Jhavar S., Jain N.K., Paul C.P. Development of micro-plasma transferred arc (p-PTA) wire deposition process for additive layer manufacturing applications, *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, vol. 214, no. 5, pp. 1102-1110.
15. Sajan Kapil, Fisseha Legesse, Pravin Milind Kulkarni, Prathmesh Joshi, Ankit Desai, Karunakaran K.P. Hybrid Layered Manufacturing using Tungsten Inert Gas Cladding, *Progress in Additive Manufacturing*, 2016, vol. 1, no.1, pp. 79-91. DOI: 10.1007/s40964-016-0005-8
16. 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.
17. 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
18. 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.
19. 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., available at: <http://www.scientific.net/KEM.450.461>. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.450.461
20. 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.

21. 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.
22. 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.
23. Riedlbauer D., Merghem 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.
24. Pozdeev A.A., Niashin Iu.I., Trusov P.V. Ostatochnye napriazheniia: teoriia i prilozheniia [Residual stresses: the theory and applications]. *Moscow, Nauka*, 1982, 112 p.
25. Beraud N., Vignat F., Villeneuve F., Dendievel R. New Trajectories in Electron Beam Melting Manufacturing to Reduce Curling Effect, *Procedia CIRP*, 2014, vol. 17, pp. 738-743. DOI: 10.1016/j.procir.2014.02.038
26. Seidel C., Zaeh M.F., Wunderer M., Weirather J., Krol T.A., Ott M. Simulation of the Laser Beam Melting Process – Approaches for an Efficient Modelling of the Beam-material Interaction, *Procedia CIRP*, 2014, vol. 25, pp. 146-153, DOI: 10.1016/j.procir.2014.10.023
27. Giirtler F.-J., Karg M., Leitz K.-H., Schmidt M. Simulation of Laser beam melting of steel powders using the three-dimensional volume of fluid method, *Physics Procedia*, 2013, vol. 41, pp. 881-886. DOI: 10.1016/j.phpro.2013.03.162
28. Markl M., Ammer R., Ljungblad U., Riide U., Korner C. Electron beam absorption algorithms for electron beam melting processes simulated by a three-dimensional thermal free surface lattice boltzmann method in a distributed and parallel environment. *Procedia Computer Science*, 2013, Vol. 18, pp. 2127-2136, doi: 10.1016/j.procs.2013.05.383
29. Mohanty S., Hattel J.H. Numerical Model based Reliability Estimation of Selective Laser Melting Process, *Physics Procedia*, 2014, vol. 56, pp. 379-389, DOI: 10.1016/j.phpro.2014.08.135
30. Ilin A., Logvinov R., Kulikov A., Prihodovsky A., Xu H., Ploshikhin V., Benjamin Gunther, Florian Bechmann, Computer Aided Optimisation of the Thermal Management During Laser Beam Melting Process, *Physics Procedia*, 2014, vol. 56, pp. 390-399. DOI: 10.1016/j.phpro.2014.08.142
31. Papadakis L., Loizou A., Risse J., Schrage J. Numerical Computation of Component Shape Distortion Manufactured by Selective Laser Melting, *Procedia CIR*, 2014, vol. 18, pp. 90-95, DOI: 10.1016/j.procir.2014.06.113
32. Shishkovsky I. V., Volyansky I. Experimental and numerical modelling of function-graded porous filter elements, synthesized by the SLS method, *High Value Manufacturing: Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*, Proceedings of the 6th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, Leiria, Portugal, 1-5 October 2013, pp. 55.
33. Agelet de Saracibar C., Lundbäck A., Chiumenti M., Cervera M. Shaped Metal Deposition Processes, In book: Encyclopedia of Thermal Stresses. *Publisher: Springer Dordrecht* 2014, pp. 4346-4355. DOI: 10.1007/978-94-007-2739-7_808.
34. Lundbäck A. Modelling of metal deposition, *Finite Elements in Analysis and Design*, 2011, vol. 47, pp. 1169-1177.
35. Chiumenti M., Cervera M., Salmi A., Agelet de Saracibar C., Dialami N., Matsui K. Finite element modeling of multi-pass welding and shaped metal deposition processes, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2010, vol. 199, pp. 2343-2359.
36. Beliaev N.M., Riadno A.A. Metody teorii teploprovodnosti. Ch. 1 [The methods of the theory of heat conductivity]. *Moscow, Vysshaia shkola*, 1982, 327 p.
37. Pobedria B.E. Mekhanika kompozitsionnykh materialov [Mechanics of composition materials]. *Moscow, Izdatel'stvovo Mosk. un-ta*, 1984, 336 p.
38. Pobedria B.E. Chislennye metody v teorii uprugosti i plastichnosti [Numerical methods in the theory of elasticity and plasticity]. *Moscow, Izd-vo MGU*, 1981. 343 p.
39. Overfelt R. A., Sahai V., Ko Y. K., Berry J. T. Porosity in cast equiaxed alloy 718 Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives, *Proceedings of the International Symposium on Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives*, Pittsburg, Pennsylvania, 1994, pp. 189-200.
40. Nowotnik A., Pędrak P., Sieniawski J., Góral M. Mechanical properties of hot deformed Inconel 718 and X750, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2012, vol. 50, is. 2, pp. 74-80.
41. Brown S.B., Kim K.H., Anand L. An internal variable constitutive model for hot working of metals, *International Journal of Plasticity*, 1989, vol. 5, pp. 95-130.