

Чехонин К. А.
K. A. Chekhonin

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЛАЗЕРНЫХ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

MODELING OF RESIDUAL STRESSES IN LASER ADDITIVE TECHNOLOGIES

Чехонин Константин Александрович – доктор физико-математических наук, руководитель ХО ИПМ ДВО РАН (Россия, Хабаровск); 680038, г. Хабаровск, ул. Серышева, 60, оф. 312. E-mail: lex7861@rambler.ru.
Konstantin A. Chekhonin – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of Institute of Applied Mathematics FEB RAS, Khabarovsk Division (Russia, Khabarovsk); off. 312, 60 Seryshev St., Khabarovsk, 680038. E-mail: lex7861@rambler.ru.

Аннотация. Рассматривается быстропротекающий трёхмерный процесс консолидации слоя металла, полученного при реализации аддитивной технологии путём прямой подачи порошка и энергии лазера. В основу математической модели положены уравнения равновесия с вязкоупругопластической реологической моделью. Учитывается влияние температуры и фазового состояния среды на её физико-механические и теплофизические свойства. Численное решение задачи производится методом конечных элементов с использованием адаптивного алгоритма построения сеточной области. Показано влияние технологических режимов (мощности лазера, скорости сканирования) на эволюцию технологических напряжений в наращиваемом слое металла.

Summary. The paper considers a fast three-dimensional process of consolidation of a metal layer obtained by implementing additive technology by direct supply of powder and laser energy. The mathematical model is based on equilibrium equations with a viscous-elastoplastic rheological model. The influence of temperature and phase state of the medium on its physical, mechanical and thermal properties is taken into account. The numerical solution of the problem is performed by the finite element method using an adaptive algorithm for constructing a grid domain. The influence of process modes (laser power, scanning speed) on the evolution of process stresses in the growing metal layer is shown.

Ключевые слова: метод конечных элементов, лазерные аддитивные технологии, затвердевание металла, вязкость, упругопластичность, остаточные напряжения.

Key words: finite element method, laser additive technology, metal solidification, viscosity, elastic-plasticity, residual stress.

Работа выполнена в рамках госзадания ИПМ ДВО РАН (№ 075-00459-24-00).

УДК 532.2

Введение. В лазерном аддитивном производстве металлоизделий определение остаточных напряжений необходимо для достижения точности размеров выращиваемого изделия (коробление), предотвращения преждевременного усталостного его разрушения и расслоения [1; 2]. Поскольку на аддитивный процесс наращивания влияет более 70 параметров [2], экспериментальные исследования по определению остаточных напряжений требуют много времени и средств. Более того, экспериментальные измерения зависят от формы и размера изделия, уровня и эволюции измеренных напряжений, подготовки образцов к измерению и точности измерения методами рентгеновской или нейтронной дифракции. В этих условиях математическое моделирование термомеханических процессов при затвердевании металла в технологиях аддитивного производства изделий имеет большое значение и является менее затратным методом исследования с большей информативностью [1; 2]. Процесс аддитивного производства включает нагрев, плавление и затвердевание расплава в условиях движущегося лазерного источника энергии с послойным выращива-

нием изделия. В результате этого различные области заготовки подвергаются повторному нагреву и охлаждению [2]. Пространственно-временные температурные циклы сопровождаются аккумуляцией введённого от лазерного источника тепла и развитием остаточных напряжений и деформаций, приводящих к возможному образованию дефектов (трещины, расслоения, коробление и т. д.) [1–3].

Однако и математическая формализация лазерного аддитивного наращивания сопряжена с большими трудностями [2]. При затвердевании металла в нём протекают сложнейшие физические, диффузионные, химические, металлургические и микроструктурные процессы. Фазовый переход в материале сопровождается большими градиентами температур (до $G = 14$ град/мкм) и определяет уровень и эволюцию технологических напряжений. Их значения могут превысить предел набранной прочности материала, что приводит к образованию микротрещин, вплоть до образования магистральных. Высокая скорость охлаждения ($10^3 \dots 10^6$ град/с) определяет формирующуюся морфологию и микроструктуру материала (например, размер и ориентацию зёрен), а следовательно, и его физико-механические свойства.

Кроме этого, фазовый переход в металлах представляет собой сильный релаксационный процесс. Считается [2], что в интервале температур $\Delta T = (T_m - 0,8T_m)$ в окрестности температуры плавления в затвердевающем металле преобладают вязкоупругие свойства. В дальнейшем, в процессе охлаждения материала и микроструктурных изменений, его реологические свойства представляются в виде упругопластических моделей [2] с зависящими от температуры физико-механическими свойствами. С теоретической точки зрения рассматриваемую задачу можно отнести к механике растущих тел [4; 5]. В этих условиях аналитическое решение рассматриваемой задачи удаётся получить в крайне упрощённых постановках [4–6].

Одна из первых работ, посвящённых построению определяющих соотношений при затвердевании металлов с упругопластической реологией применительно к аддитивным технологиям, выполнена Линдгреном [7]. В работе [8] представлено численное решение рассматриваемой задачи в упрощённой упругой постановке с использованием метода конечных разностей. Показано, что продольные остаточные напряжения (по направлению сканирования), возникающие в формируемом металлическом слое, в два раза превышают поперечные.

В работах [9–16] рассматривается математическое моделирование отверждения вязкоупругого материала с использованием метода конечных элементов. В рамках двухкомпонентной среды на основе феноменологического подхода разработана система определяющих уравнений, описывающих термомеханическое поведение материала в условиях затвердевания. Модель предназначена для описания напряжённо-деформированного состояния в температурном диапазоне, охватывающем интервалы реализации фазовых и релаксационных переходов при конечных деформациях. Основные уравнения термомеханохимии оказываются связанными с взаимным влиянием напряжённо-деформированного состояния отверждаемого материала и кинетики отверждения. В настоящей работе развивается этот подход для математического моделирования остаточных напряжений, возникающих при затвердевании вязкоупругопластического слоя металла. Разработанная математическая модель используется для анализа влияния режимов 3D-печати в прямых лазерных технологиях на напряжённо-деформированное состояние наращиваемого слоя металла. Эволюцию распределения температуры в слое и его геометрии получаем из результатов численного моделирования гидродинамической стадии наращивания [17; 18].

Постановка задачи. Лазерное наращивание слоя с использованием аддитивной технологии представляет собой сложный быстропротекающий физический процесс, включающий в себя явления конвективного тепломассопереноса, термодиффузии, прироста массы путём струйной подачи порошка потоком инертного газа, сопровождаемые фазовым переходом плавления при воздействии лазерным излучением с последующим затвердеванием остывающей ванны расплава. В начальный момент времени предполагаем плоскость поверхности подложки (см. рис. 1) плоской с начальной температурой подогрева. При включении лазера рабочая поверхность подложки начинает плавиться с образованием расплавленной ванночки в форме параболоида. В неё с характер-

ным временем запаздывания, вызванного полётом частиц от сопла до поверхности подложки, начинает постоянно добавляться поток массы порошка. В результате на поверхности подложки формируется металлический слой (см. рис. 1).

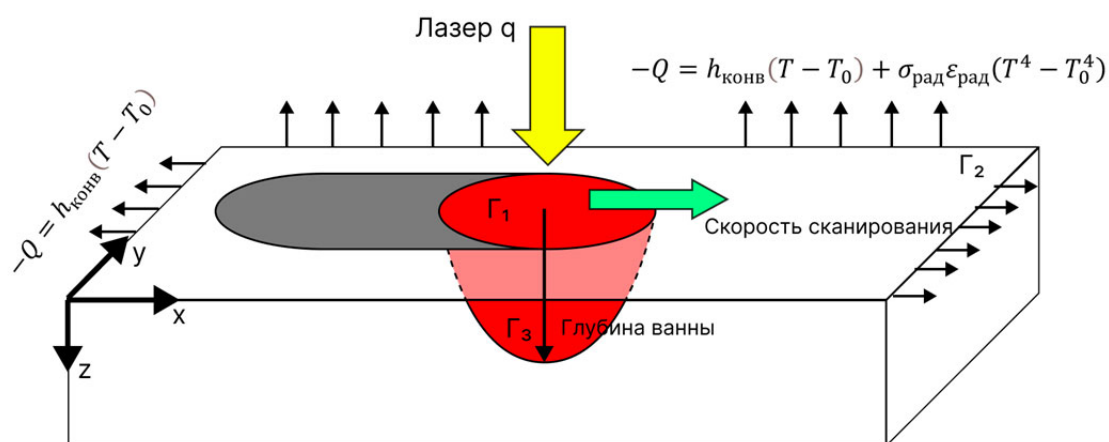


Рис. 1. Расчётная область

Математическая модель гидродинамической стадии тепломассопереноса в ванне расплава с реализацией численного алгоритма приведена в работах [17; 18]. Путём её численного решения получаем эволюцию температурного поля и профиля наращиваемого металлического слоя. Эти данные являются начальными условиями рассматриваемой термомеханической задачи. Считаем, что все физико-механические параметры материала (модуль сдвига, объёмный модуль, предел текучести, вязкость и т. д.), определяющие его упругие, вязкие и пластические свойства, зависят от фазового состояния, температуры и приведены на рис. 2.

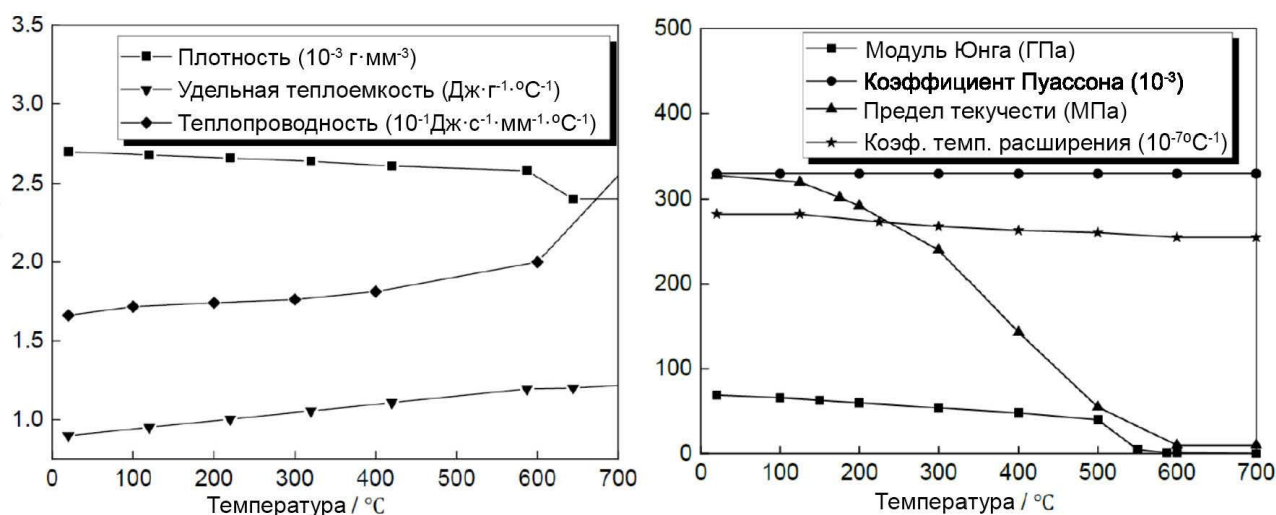


Рис. 2. Зависимость свойств материала от температуры

Таким образом, с учётом сделанных предположений термомеханическая задача определения остаточных напряжений при известном распределении температурного поля $T = T(t, x, y, z)$ в расчётной области (см. рис. 1) будет заключаться в определении вектора перемещений $\vec{u}$ и гидростатического давления p , удовлетворяющих уравнениям равновесия:

$$\nabla \cdot \sigma + \vec{b} = 0$$

с условием связи

$$(\nabla \cdot \vec{u} - e^T) - \frac{p}{K} = 0,$$

где $\sigma = p\mathbf{I} + \mathbf{s}(\vec{u})$ – полный тензор напряжений, здесь $\mathbf{s}$ – девиатор тензора напряжений σ ; $\vec{b}$ – вектор объёмных сил; $K(T)$ – объёмный модуль упругости.

Объёмные деформации включают в себя деформации теплового расширения и структурной усадки [15; 16]:

$$e^T(T, f_s) = e^{\text{расшир}}(T) + e^{\text{структ}}(f_s),$$

$$e^{\text{расшир}}(T) = \alpha(T)(T - T_0),$$

$$e^{\text{структ}}(f_s) = \beta f_s,$$

где $f_s = (1 - f_l)$ – доля твёрдой фазы в расплаве, здесь f_l – относительное содержание жидкой фазы; $\alpha = \alpha(T)$ – объёмный коэффициент теплового расширения; $\beta = \frac{\Delta V^{pc}}{V_0}$ – параметр структурной усадки, здесь V_0 – начальный объём; ΔV^{pc} – изменения объёма за счёт структурной усадки,

$$f_l = \begin{cases} 0, & T < T_s \\ \frac{T - T_l}{T_l - T_s}, & T_s < T < T_l \\ 1, & T > T_l \end{cases}$$

$$T \in [T_s, T_l].$$

Для определения пластических деформаций используем ассоциированное правило течения:

$$\Phi = \sqrt{\frac{3}{2}} \mathbf{s} : \mathbf{s} - \sigma_y f_s \leq 0,$$

где $\sigma_y(T)$ – предел текучести.

В качестве реологического уравнения затвердевающего расплава металла принимаем модель Шведова – Бингама:

$$e^p \dot{\gamma} \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{s}} = \dot{\gamma} \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\mathbf{s}}{\|\mathbf{s}\|}, \quad \dot{\gamma} = \frac{1}{\eta} \left\langle \sqrt{\frac{3}{2}} \mathbf{s} : \mathbf{s} - \sigma_y f_s \right\rangle,$$

где $\eta(T)$ – пластическая вязкость; $\|\bullet\|$ – норма Фробениуса; $\langle \bullet \rangle$ – скобки Макалея.

Моделирование производим с граничными условиями, приведёнными на рис. 1, и отсутствием крепления подложки.

Следует отметить: приведённая выше математическая модель позволяет проводить моделирование от фазового состояния вязкой несжимаемой жидкости до условий полного затвердевания и охлаждения слоя.

Результаты расчётов. Численное решение приведённой термомеханической задачи производим с использованием метода смешанных конечных элементов с выбором аппроксимирующего базиса полей перемещения и гидростатического давления, удовлетворяющего LBB-условию [19].

Лазер с варьируемой интенсивностью излучения $E_s = 60 \dots 80$ Дж/мм² сканирует подложку (см. рис. 1) размером 60x10x10 мм со скоростью $V_{ск} = 6 \dots 10$ мм/с при массовом расходе порошка $M = 4 \dots 8$ г/мин. Теплофизические свойства материалов порошка и подложки приведены на рис. 2.

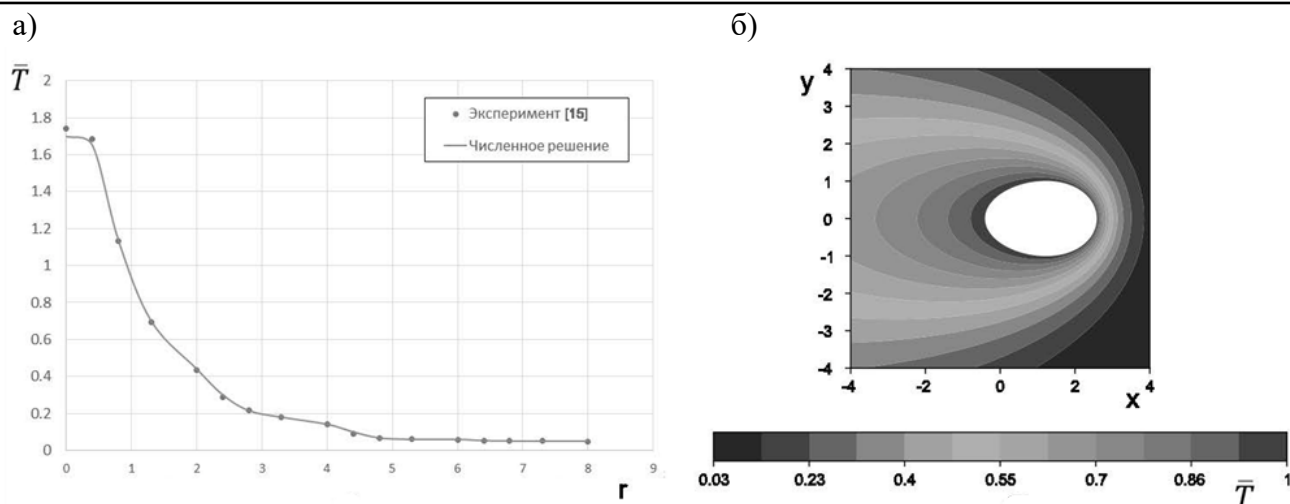


Рис. 3. Распределение безразмерной температуры, отнесённой к температуре плавления, в окрестности лазерного источника (а) и распределение нормализованной температуры в сечении Oxy (б) на рис. 1. Белым цветом выделена ванна с расплавом ($T > T_m$)

На рис. 3 иллюстрируется распределение безразмерной температуры (нормализованной температурой плавления) в окрестности области воздействия лазерного луча в условиях установившегося режима тепломассопереноса в ванне с расплавом [18]. Сравнение результатов численного расчёта с экспериментом свидетельствует об адекватности математической модели [15]. Ввиду больших градиентов температуры в области затвердевания расплава конечно-элементная сетка адаптируется к решению с её измельчением в зонах максимальных градиентов (см. рис. 4).

Пространственно-временные изменения профилей расплавленной ванны и формируемого слоя металла при лазерном направленном энергетическом наращивании [17; 18] в значительной степени влияют на эволюцию технологических напряжений и образование дефектов 3D-печати. Более того, они оказывают решающее влияние на геометрическую целостность наращиваемого слоя (эффект баллинга, отсутствие адгезии с подложкой и т. д.). На рис. 5 приведена эволюция геометрии ванны с расплавом и наращиваемого слоя. Из результатов расчётов следует, что в процессе наращивания геометрия ванны расплава и формируемого слоя приобретает квази-установившееся состояние.

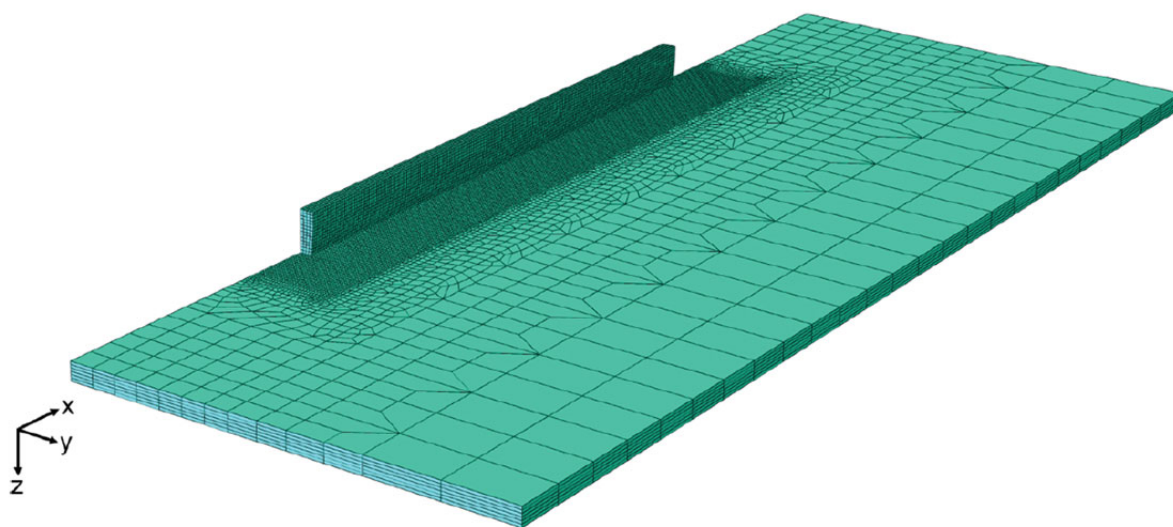


Рис. 4. Конечно-элементная сетка расчётной области с адаптацией

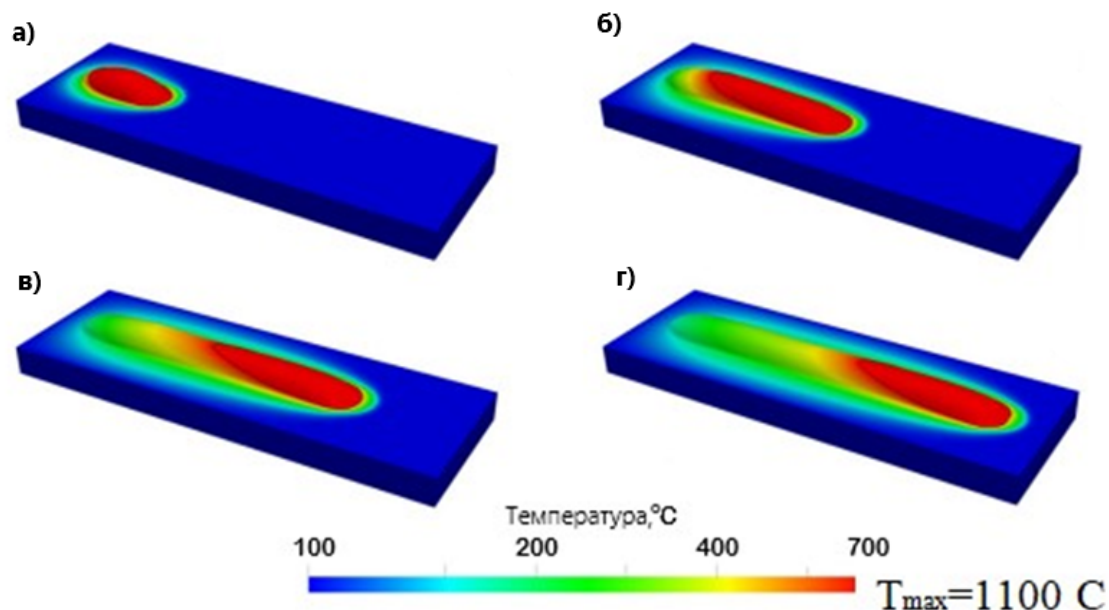


Рис. 5. Эволюция температуры и геометрии ванны с наращиваемым слоем

При охлаждении слоя до комнатной температуры в нём возникают остаточные напряжения и деформации. Распределение продольных и поперечных напряжений в системе слой-подложка приведено на рис. 6. Из результатов численных расчётов следует, что в слое формируются растягивающие напряжения, а в подложке – сжимающие. При этом уровень поперечных напряжений в слое ниже продольных.

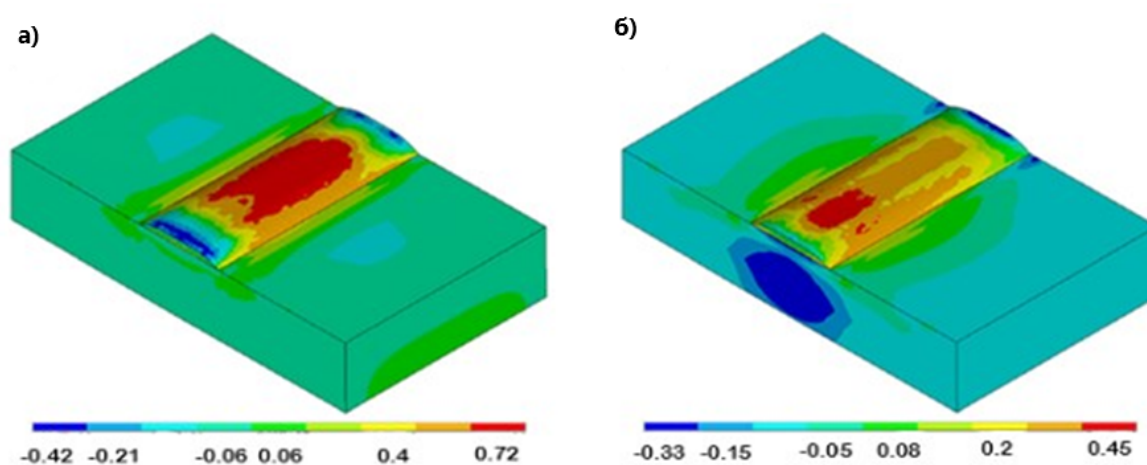
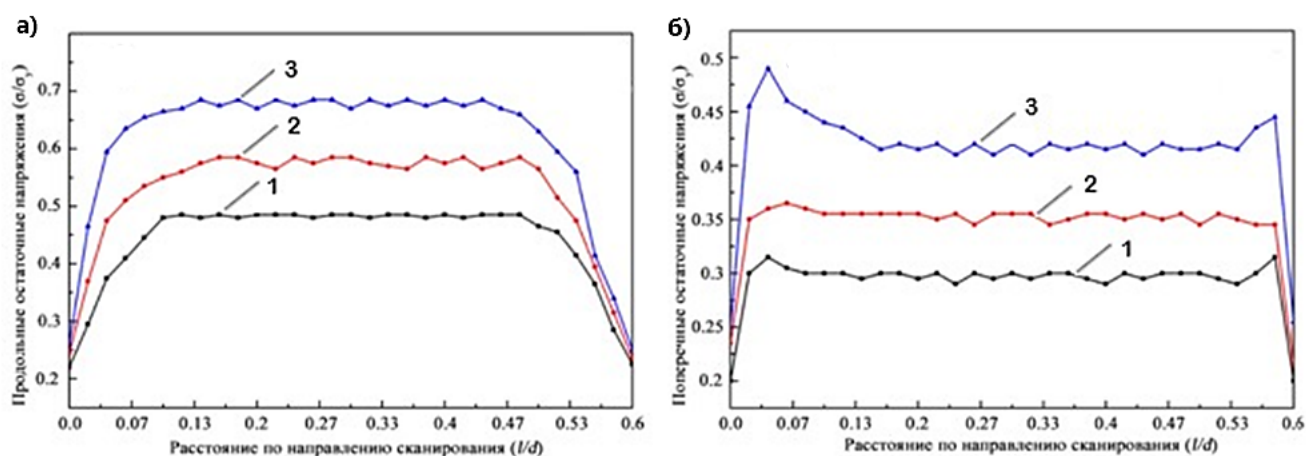


Рис. 6. Распределение нормализованных к пределу текучести $\left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)$ остаточных продольных (а) и поперечных (б) напряжений

При заданном массовом расходе порошка наибольшее влияние на уровень остаточных напряжений оказывают технологические режимы процесса наращивания слоя – мощность лазера и скорость сканирования. На рис. 7 иллюстрируется распределение остаточных напряжений на поверхности слоя в функции от интенсивности излучения лазерного источника. Расчёт производим при постоянной скорости сканирования. Из результатов расчёта следует, что увеличение мощности лазерного источника приводит к росту продольных и поперечных

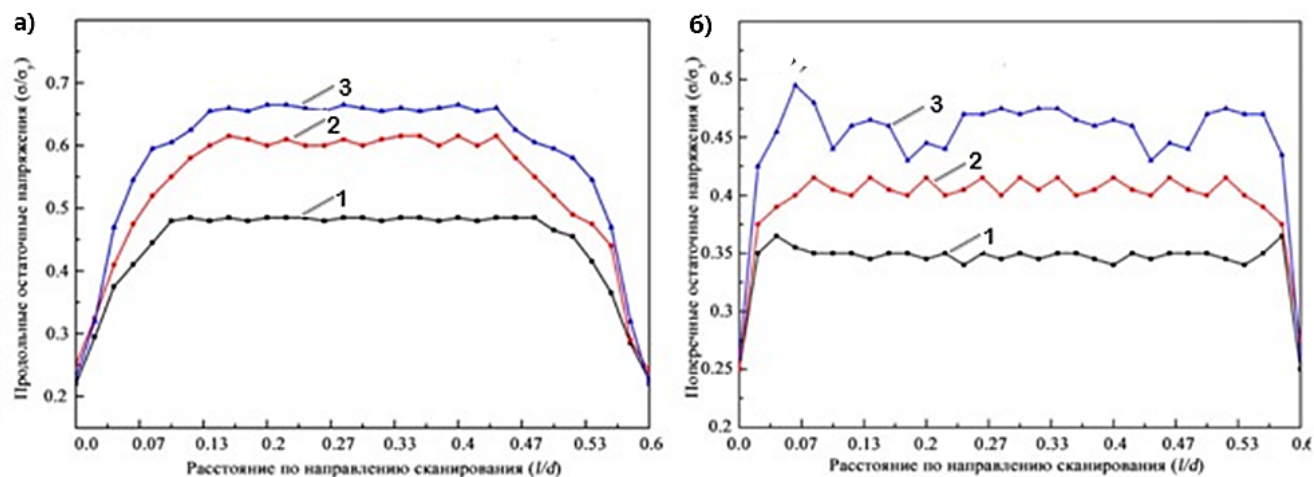
остаточных напряжений (см. рис. 7). Уровень поперечных остаточных напряжений (см. рис. 7, б) в 1,6 раз меньше, что согласуется с известными численными и экспериментальными исследованиями [2].



1 – $E_s = 60$ Дж/мм²; 2 – $E_s = 70$ Дж/мм²; 3 – $E_s = 80$ Дж/мм²

Рис. 7. Распределение нормализованных остаточных напряжений в функции от интенсивности лазерного излучения: а – продольные остаточные напряжения; б – поперечные остаточные напряжения

На рис. 8 показано распределение остаточных напряжений в функции от скорости сканирования лазерным источником поверхности подложки при постоянной его интенсивности излучения. Из результатов расчёта следует, что увеличение скорости сканирования также приводит к росту величины продольных (см. рис. 8, а) и поперечных (см. рис. 8, б) остаточных напряжений. Это связано с ростом градиента температуры в нарастающем слое.



1 – $V_{\text{ск}} = 400$ мм/мин; 2 – $V_{\text{ск}} = 500$ мм/мин; 3 – $V_{\text{ск}} = 600$ мм/мин

Рис. 8. Распределение нормализованных $\left(\frac{\sigma}{\sigma_y}\right)$ остаточных напряжений в функции от скорости сканирования: а – продольные остаточные напряжения, б – поперечные остаточные напряжения

Закключение. Рассмотрен быстропротекающий трёхмерный процесс консолидации наращивания слоя металла с использованием прямой подачи порошка и энергии лазера. Моделирование уровня возникающих технологических напряжений проведено с учётом эволюции температурного

поля в ванне с расплавом. Достоинством предложенных определяющих соотношений в термомеханической модели является описание непрерывности в эволюции напряжённо-деформированного состояния в условиях фазового перехода расплава (от вязкой несжимаемой жидкости до затвердевающего слоя с упругопластической реологией). Предложен устойчивый численный алгоритм решения задачи с использованием метода смешанных конечных элементов. Показано влияние мощности лазерного источника энергии и скорости сканирования им поверхности подложки на уровень остаточных технологических напряжений в системе подложка-слой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аддитивные технологии. Материалы и технологические процессы: моногр. / А. И. Рудской [и др.]. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021. – 516 с.
2. Mukherjee T., DebRoy T., Theory and Practice of Additive Manufacturing 1st Edition, Wiley, 2023, 522 p.
3. Liu T. S., Chen P., Qiu F., Yang H., Tan N. Y. J., Chew Y., Wang D., Li R., Jiang Q.-C., Tan Ch., Review on laser directed energy deposited aluminum alloys, International Journal of Extreme Manufacturing, 6:2, (2024), 022004.
4. Арутюнян, Н. Х. Контактные задачи механики растущих тел / Н. Х. Арутюнян, А. В. Манжиров, В. Э. Наумов. – М.: Наука, 1991. – 176 с.
5. Арутюнян, Н. Х. Механика растущих вязкоупругопластических тел / Н. Х. Арутюнян, А. Д. Дроздов, В. Э. Наумов. – М.: Наука, 1987. – 471 с.
6. Mercelis, P., Kruth, J-P. Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. Rapid Prototyping Journal 12/5 (2006) 254-265.
7. Lindgren, L.E. Finite Element Modeling and simulation of Welding. Part 1: Increased Complexity // Journal of Thermal Stresses, 24:2, 141-192.
8. Gusarov, V., Pavlov, M., Smurov, I. Residual Stresses at Laser Surface Remelting and Additive Manufacturing, Physics Procedia, 12, (2011), 248-254.
9. Chekhonin, K. A., Vlasenko, V. D. Numerical Modeling of Compression Cure High-Filled Polymer Material, Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics, 14:6, (2021), 805-814.
10. Чехонин, К. А. О термодинамической согласованности связанной модели отверждения эластомера при конечных деформациях / К. А. Чехонин // Дальневосточный математический журнал. – 2022. – Т. 22. – № 1. – С. 107-118.
11. Чехонин, К. А. Микромеханическая модель высокоэнергетического материала при отверждении / К. А. Чехонин // Дальневосточный математический журнал. – 2022. – Т. 22. – № 1. – С. 119-124.
12. Chekhonin, K. A., Vlasenko, V. D. Multiscale modeling of the effect of curing stresses on the deformation properties and damageability of high-energy materials // AIP Conference Proceedings. – 2023. – V. 2504. – № 020001.
13. Чехонин, К. А. Градиентный алгоритм оптимизации температурно-конверсионной задачи при отверждении высоконаполненных полимерных материалов / К. А. Чехонин, В. Д. Власенко // Информатика и системы управления. – 2019. – № 4. – С. 58-70.
14. Bulgakov, V. K., Chekhonin, K. A. Modeling of a 3D Problem of compression forming system «Composite shell – low compressible consolidating Filler», J. Mathematical Modeling, 4 (2002), 121-131.
15. Гриценко, А. А. Численное моделирование остаточных напряжений в формируемом металлическом слое с использованием подвижного лазерного источника энергии / А. А. Гриценко, К. А. Чехонин // Дальневосточный математический журнал. – 2024. – Т. 23. – № 1. – С. 22-32.
16. Chekhonin, K. A. Current state and development of the theory of curing high-energy composite polymer materials // Журнал Сибирского федерального университета. Математика и физика. – 2024. – Т. 17. – № 1. – С. 106-114.
17. Белозеров, Н. И. Роль поверхностного натяжения и смачивания расплава металла на твёрдой поверхности подложки при выращивании тонкостенных конструкций путём подачи лазерной энергии и порошка / Н. И. Белозеров, К. А. Чехонин // Дальневосточный математический журнал. – 2024. – Т. 23. – № 2. – С. 157-169.
18. Белозеров, Н. И. Трёхмерное конечно-элементное моделирование течения расплава металла со свободной поверхностью в условиях движущегося лазерного источника / Н. И. Белозеров, К. А. Чехонин // Дальневосточный математический журнал. – 2024. – Т. 23. – № 1. – С. 9-21.
19. Булгаков, В. К. Основы теории метода смешанных конечных элементов / В. К. Булгаков, К. А. Чехонин. – Хабаровск: Изд-во Хабаровского политехнического института, 1999. – 283 с.