Федулов, Б.Н. Моделирование отверждения фотополимера / Б.Н. Федулов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2024. – № 2. – С. 53–58. DOI: 10.15593/perm.mech/2024.2.06

Perm Polytech Style: Fedulov B.N. Modeling of Photopolymer Curing. *PNRPU Mechanics Bulletin,* 2024, no. 2, pp. 53-58. DOI: 10.15593/perm.mech/2024.2.06



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА
№ 2, 2024
PNRPU MECHANICS BULLETIN
https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2024.2.06
УДК 531.8

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТВЕРЖДЕНИЯ ФОТОПОЛИМЕРА

Б.Н. Федулов

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 07 сентября 2023 г.
Одобрена: 21 ноября 2023 г.
Принята к публикации:
21 мая 2024 г.

Ключевые слова:

фотополимер, отверждение, усадка, остаточные напряжения, стереолитография, моделирование технологических процессов, 3D-печать, аддитивные технологии.

АННОТАЦИЯ

Рассматривается процесс отверждения фотополимерного материала. Воздействие света на фотополимерный материал запускает в нем реакцию, которая приводит к конверсии полимерных цепочек, что, в свою очередь, имеет следствием несколько эффектов: выделение тепла и повышение температуры, отверждение или набор жесткости материала, а также появление объемной усадки. Такие процессы искажают первоначальную форму материала. При неравномерном облучении материала процессы запускаются с разной интенсивностью и определенной задержкой относительно друг друга, что влечет за собой появление остаточных напряжений. В промышленности большое распространение получила технология стереолитографии, при которой материал облучается по определённым областям, так называемым маскам, после чего неотвержденный материал удаляется. На таком эффекте поострены современные фотополимерные 3D-принтеры, которые послойно с различными масками отверждают материал. При 3D-печати отверждение верхнего слоя сопровождается большей усадкой относительно нижнего слоя, который к этому моменту имеет большую степень отверждения, что приводит к появлению остаточных напряжений. Таким образом, с появлением каждого нового слоя в детали происходит постепенное накопление остаточных напряжений. Как следствие, искажается первоначально планируемая форма изделия и происходит потеря прочностных характеристик. Остаточные напряжения, реализуемые в процессе печати, могут превзойти прочность материала, что зачастую приводит к резкому росту трещин и растрескиванию печатаемой конструкции. В данном исследовании предлагается модель фотополимерного материала и алгоритм действий по моделированию отверждения. Рассматривается процесс стереолитографии на основе воздействия подвижного лазера. Приводится сравнение с экспериментом.

© **Федулов Борис Никитович** – д. ф.-м. н., проф. каф. теории пластичности мех.-мат. факультета, e-mail: fedulov.b@mail.ru.

Fedulov Boris Nikitovich – Doctor of Sciences, Professor of the Department of Theory of Plasticity of the Faculty of Mechanics and Mathematics, e-mail: fedulov.b@mail.ru.



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

MODELING OF PHOTOPOLYMER CURING

B.N. Fedulov

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 07 September 2023
Approved: 21 November 2023
Accepted for publication:
21 May 2024

Keywords:

photopolymer, curing, shrinkage, residual stresses, stereolithography, modeling of technological processes, 3D printing, additive technologies.

ABSTRACT

The paper considers the process of curing a photopolymer material. The effect of light on a photopolymer material triggers a reaction that leads to the conversion of polymer chains, which leads to the release of heat and an increase of temperature, solidification or an increase of stiffness of the material, and is also accompanied by a volumetric shrinkage. Such processes cause the distortion of the initial shape of the material. With nonuniform irradiation of the material, the processes are initiated with different intensities and a certain delay causing residual stresses. Stereolithography technology has become widespread in industry, in which the material is irradiated in certain areas, the so-called masks, after which the uncured material is removed. Modern photopolymer 3D printers are focused on this effect, which cures the material in layers with various masks. In 3D printing, the curing of the upper layer is accompanied by a higher shrinkage relative to the lower one, which by this time has a higher degree of curing leading to residual stresses. Thus, each new layer in a produced part initiates a gradual accumulation of residual stresses. As a result, there is a distortion of the originally planned shape of the product and a loss of strength characteristics. Residual stresses realized during the printing process can exceed the strength of the material, which often leads to a rapid increase in cracks and damage of the printed structure. This study proposes a model of a photopolymer material and an algorithm for modeling curing. It considers the process of stereolithography based on the action of a movable laser. A comparison with the experiment is given.

Введение

Стереолитография (SLA) – один из наиболее важных методов, используемых в процессах быстрого создания прототипов. Данная тема представляет собой большой интерес для промышленности в силу существенной экономии времени и ресурсов для создания прототипа изделия. Одной из основных проблем 3D-печати на основе фотополимерных материалов является искажение формы в процессе затвердевания материала, а при печати крупногабаритных элементов – и возможное разрушение из-за накопления остаточных напряжений. Данной теме посвящено довольно много работ, связанных как с моделированием химических реакций и структурных изменений, так и с процессом появления остаточных напряжений на макроуровне [1–15]. Также можно отметить работы по отверждению полимеров в целом, так как подходы по моделированию довольно схожи, меняется только суть структурного изменения и химической реакции [16–21]. На данный момент общепринятого подхода к моделированию нет, что, по-видимому, связано с междисциплинарностью процесса отверждения. В некоторых работах рассматривается по сути алгоритм, сформулированный на уровне сразу матрицы жесткости в методе конечных элементов [3–4; 7–12], в других под словами «моделирование отверждения» имеется в виду только химическая реакция [13], при этом нет уравнений, сформулированных на уровне уравнений математической физики и определяющих соотношений.

Данное исследование посвящено построению подхода к моделированию процесса печати и отверждения фотополимерного материала с формулировкой основных уравнений.

1. Излучение и экспозиция

Один из самых распространенных методов печати на основе фотополимерных материалов основан на воздействии лазера на жидкий фотополимер. Интенсивность воздействия луча или поле интенсивности на поверхности материала можно смоделировать на основе распределения Гаусса, при этом ослабление света в глубине материала реализовать на основе закона Бугера – Ламберта – Бера (1) (рис. 1).

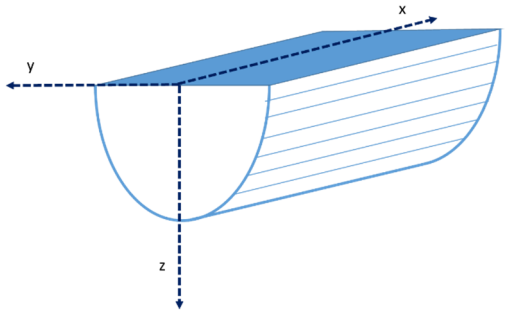


Рис. 1. Интенсивность воздействия при одном проходе лазерного луча

Fig. 1. The irradiance intensity of a single pass of the laser beam

$$I(z) = I_0 \exp(z / D_p), \qquad (1)$$

где I – интенсивность; z – координата глубины проникновения света; I_0, D_p – константы.

Поверхностное распределение интенсивности хорошо приближает следующая функция [6]:

$$I(x, y, 0) = I_0 \exp(-2(x^2 + y^2) / D_0), \quad (2)$$

где D_0 – константа, характеризующая ширину лазерного луча.

2. Химическая реакция

Химическая реакция, отвечающая эволюции отверждения, может быть смоделирована на основе уравнений Аррениуса:

$$\frac{d\alpha}{dt} = k\left(\frac{I}{I_0}\right)^{\beta}(1-\alpha)^m \alpha^n, \quad (3)$$

где α – степень конверсии; k, β, m, n – константы.

Степень конверсии является основным структурным параметром, с которым можно соотнести все механические характеристики и оценивать по нему завершенность реакции в фотополимере. В случае медленной реакции или медленного воздействия света $I(t)$ данный параметр можно приблизить экспозицией (4), что упрощает построение модели.

$$\alpha(t_1) \sim \int_0^{t_1} I(t)dt, \quad (4)$$

где t_1 – текущий момент времени.

3. Определяющие соотношения

Для описания твердеющей среды воспользуемся гипоупругой моделью [16; 17; 19; 20]:

$$\dot{\sigma}_{ij} = E_{ijkl}(\alpha, T)\dot{\varepsilon}_{kl}, \quad (5)$$

где мгновенный модуль зависит от степени конверсии полимера и температуры.

Вариант зависимости для модуля Юнга:

$$E(\alpha, T) = E_{\max}\left(1 - \exp\left(-\beta_E \int_0^t Idt\right)\right)\exp(-c_0 T), \quad (6)$$

где $E_{\max}$ – модуль при полностью завершенной реакции; β_E, c_0 – константы

Для моделирования процесса необходимо также экспериментально определить зависимость усадки от температуры и степени конверсии. Вариант соотношений для усадки:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{all} &= \varepsilon_{ch} + \varepsilon_T, \\ \varepsilon_T &= k_T \Delta T, \\ \varepsilon_{ch} &= \varepsilon_{ch}^{Max}\left(1 - \left[\exp\left(-\alpha_{ch}^1 \int_0^t I(t)dt\right)\right]^{\alpha_{ch}^2}\right). \end{aligned} \quad (7)$$

В модели среды на основе уравнений (3)–(7) по сути не использованы уравнения реакции, так как они проинтегрированы и входят в конечные соотношения в виде констант и экспозиции воздействия лазера.

Для окончательной картины необходимо добавить уравнения, связанные тепловой задачей. В общем случае температура связана с выделением тепла во время реакции, которая, в свою очередь, пропорциональна скорости реакции:

$$Q = h\frac{d\alpha}{dt}. \quad (8)$$

Но в случае относительно медленного движения лазера можно экспериментально определить прогрев материала в пятне лазерного луча [4] и аналогично уравнениям (1) и (2) использовать готовое распределение температур. В точке наибольшего воздействия лазера материал, как правило, для всех фотополимеров прогревается до 60–75 °C.

4. Пример моделирования

Таким образом, так как уравнения реакции (3) не зависят от температуры, а деформирование среды не дает вклад в тепловую задачу (8), то связь задачи механического деформирования и задач химической реакции и тепла односторонняя. Есть возможность отдельного моделирования тепла и реакции с расчетом изменения температур и структурного параметра α. После чего необходимо использовать полученные изменения параметров α и T для анализа деформирования и усадки материала. Данные процедуры были встроены в программу Abaqus для конкретных расчетов.

В качестве системы печати использовалась E-DARTS и фотополимерный материал NAF202 [4; 7]. Рассматривается задача многократного прохождения лазера по тонкой полоске фотополимера. При каждом проходе часть материала отверждается и испытывает усадку, что приводит к плавному прогибу всей полоски (рис. 2). Ширина полосы как таковая не имеет значения, так как финальный прогиб практически для всех вариантов продольного прохода лазерным лучом совпадает. Прохождение лазера производится вдоль полосы материала, скорость луча 8 мм/с.

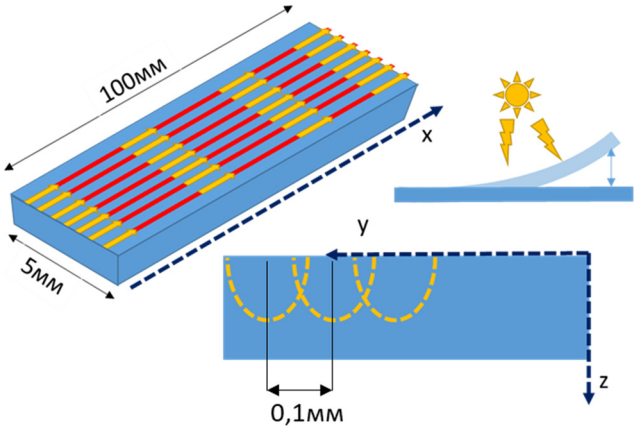


Рис. 2. Схема эксперимента

Fig. 2. Experimental scheme

Для того чтобы избежать исследований тепловых свойств материала и не моделировать экзотермическую реакцию, в задаче поле температур вводится приблизительно. Распределение температуры качественно совпадает с распределением интенсивности лазерного луча в фотополимерном материале (9), что связано с тем, что именно влияние излучения запускает реакцию, которая экзотермически повышает температуру. Проводится дополнительный эксперимент, где термопары помещаются по центру пути луча и глубину 1 и 2 мм (рис. 3). После чего, используя данные экспериментов, можно подобрать параметры распределения для поля температур (табл. 1). Видно некоторое несоответствие пиков для датчика на глубине 2 мм (рис. 3), не учтено небольшое запаздывание, но для нашей задачи эта ошибка незначительна. Поперечное относительно пути луча распределение для поля температуры можно оценить по эксперименту в работе [7] при однократном воздействии луча.

$$T = T_0 \exp(-(x / D_{Tx})^2 + (y / D_{Ty})^2) / (R_T^2 / 2)) \exp(z / D_{Tz}). \quad (9)$$

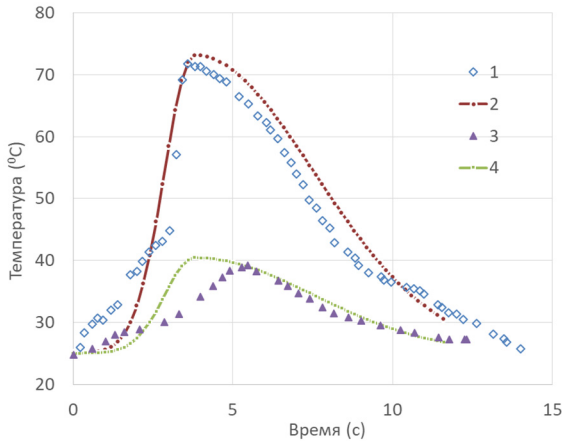


Рис. 3 Экспериментальные и аналитические значения температур на пути луча лазера: *1* – экспериментальные значения на глубине 1 мм; *2* – аналитическое значения на глубине 1 мм; *3* – экспериментальные значения на глубине 2 мм; *4* – аналитическое значения на глубине 2 мм

Fig. 3. Eperimental and analytical values of temperatures in the path of the laser beam: *1* – experimental values at a depth of 1 mm; *2* – analytical values at a depth of 1 mm; *3* – experimental values at a depth of 2 mm; *4* – analytical values at a depth of 2 mm

Таблица 1

Параметры поля температур

Table 1

Temperature field parameters

Положение относительно лазера	T_0	D_{Tx} (мм)	D_{Ty} (мм)	R_T	D_{Tz}
X<X текущее	150	5	0,5	3	0,88
X>X текущее	150	20	0,5	3	0,88

Характеристики поля излучения в нулевой точке для лазерного луча приведены в формуле (10) с соответствующими константами в табл. 2. Формула (10) представляет собой комбинацию формул (1) и (2), переписанную в более удобном виде для работы с экспериментальными данными.

$$I(x, y, z) = \frac{2P_L}{\pi R_I^2} \exp(-(x^2 + y^2) / (R_I^2 / 2)) \exp(z / D_p). \quad (10)$$

Таблица 2

Параметры поля излучения

Table 2

Irradiance field parameters

Параметр	P_L, Вт/мм^2	R_I, мм	D_p, мм
Значение	0,2	0,4	0,88

Для механического поведения деформирования используются уравнения (5) и (6). Модуль жесткости E_{ijkl} представляет собой линейно упругий вариант соотношений с постоянным коэффициентом Пуассона (ν) и изменяющимся в зависимости от степени завершенности реакции параметра α и температуры T. Механические константы для уравнений (5) и (6) приведены в табл. 3.

Таблица 3

Механические параметры

Table 3

Mechanical properties

Параметр	ν	E_{max}	β_E	C_0
Значение	0,2	0,4	0,88	–

Параметры для описания модели (7) усадки приведены в табл. 4

Таблица 4

Параметры усадки материала

Table 4

Shrinkage parameters

Параметр	k_T 1/°C	ε_{ch}^{Max}	α_{ch}^1	α_{ch}^2
Значение	0,00193	0,125	3,9	1

Конечно-элементная модель состоит из 2500 гексагональных полностью интегрируемых элементов (рис. 4). Воздействие на фотополимерный материал моделируется подвижным полем лазера и температуры. Один из концов балки закреплен таким образом, чтобы реализовать симметричные граничные условия. Так моделировалась только половина экспериментального материала. Задача решалась в геометрически линейной постановке, изменение положение лазера и температурного поля моделировалось как серия состояний равновесия, при этом при переходе от одной точки равновесия к другой менялись механические свойства. Всего рассматривалось 400 с. Размер одного инкремента по

времени был 0,08 с. Размер инкремента был выбран как наименьший, после которого разница в результатах была незначительной.

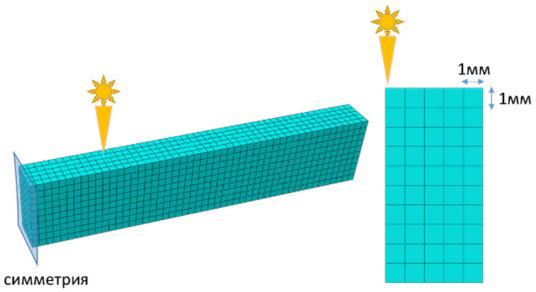


Рис. 4. Конечно-элементная модель

Fig. 4. Finite-element model

На рис. 5 показан результат моделирования продольной засветки фотополимерного материала. Данные рис. 5 соответствуют середине процесса прохождения всей поверхности образца.

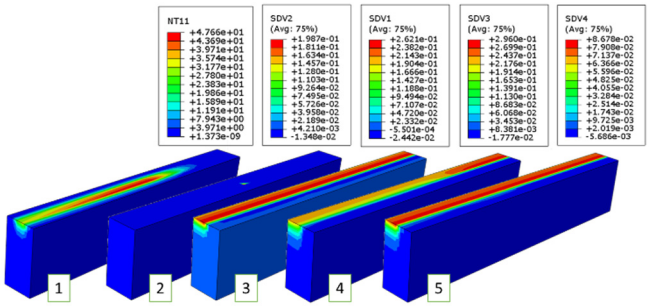


Рис. 5. Результаты моделирования: *1* – температура; *2* – интенсивность лазера; *3* – экспозиция; *4* – модуль Юнга; *5* – химическая усадка

Fig. 3. Modeling results: *1* – temperature; *2* – laser intensity; *3* – exposure; *4* – Young's modulus; *5* – chemical shrinkage

На рис. 6 показана история изменения прогиба полосы из фотополимера в процессе отверждения. Видно, что существуют определённые колебания, связанные с температурным расширением материала. При этом среднее значение прогиба растет со временем и финальный прогиб, полученный в моделировании, хорошо согласуется с экспериментом.

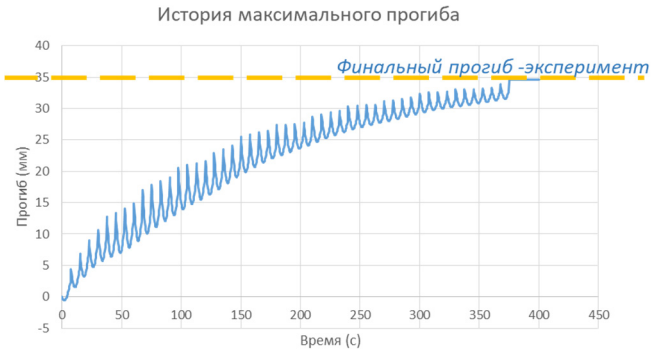


Рис. 6. Изменения прогиба твердеющей полоски фотополимера

Fig. 6. Changes in the deflection of the reacting photopolymer strip

Заключение

Предложена модель для описания процесса отверждения фотополимерного материала. Показано сходство с экспериментальными данными. Первым важным результатом работы является последовательность предположений, которые уменьшали количество неизвестных параметров. Так, использование аналитических полей температур существенно сокращает экспериментальную работу на первом этапе с новым материалом. Второй существенный вывод – это удачная стратегия использования частично засвечиваемых полосок материала и последующего анализа прогиба как макроэксперимента. Отталкиваясь от такой серии экспериментов с разными режимами засветки, можно быстро получить довольно качественную модель фотополимерного связующего для оценки остаточных напряжений в изделии.

Библиографический список

1. Huang, J. A review of stereolithography: Processes and systems / J. Huang, Q. Qin, J. Wang // Processes. – 2020. – Vol. 8, no. 9. – P. 1138.

2. Determination of residual stresses in products in additive production by the layer-by-layer photopolymerization method / P.S. Bychkov [et al.] // Mechanics of Solids. – 2017. – Vol. 52. – P. 524–529.

3. Numerical analysis of stereolithography processes using the finite element method / G. Bugeda [et al.] // Rapid Prototyping Journal. – 1995. – Vol. 1, no. 2. – P. 13–23.

4. Huang, Y.M. Curl distortion analysis during photopolymerisation of stereolithography using dynamic finite element method / Y.M. Huang, C.P. Jiang // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2003. – Vol. 21. – P. 586–595.

5. Chockalingam, K. Influence of layer thickness on mechanical properties in stereolithography / K. Chockalingam, N. Jawahar, U. Chandrasekhar // Rapid Prototyping Journal. – 2006. – Vol. 12, no. 2. – P. 106–113.

6. Vat photopolymerization processes / I. Gibson [et al.] // Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. – 2015. – P. 63–106.

7. Huang, Y.M. Fundamental study and theoretical analysis in a constrained-surface stereolithography system / Y.M. Huang, S. Kuriyama, C.P. Jiang // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2004. – Vol. 24. – P. 361–369.

8. Huang, Y.M. CAD/CAE/CAM integration for increasing the accuracy of mask rapid prototyping system / Y.M. Huang, H.Y. Lan // Computers in Industry. – 2005. – Vol. 56, no. 5. – P. 442–456.

9. Huang, Y.M. Increased accuracy by using dynamic finite element method in the constrain-surface stereolithography system / Y.M. Huang, J.Y. Jeng, C.P. Jiang // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – Vol. 140, no. 1–3. – P. 191–196.

10. Huang, Y.M. Numerical analysis of a mask type stereolithography process using a dynamic finite-element method / Y.M. Huang, C.P. Jiang // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2003. – Vol. 21. – P. 649–655.

11. Huang, Y.M. Compensation of distortion in the bottom exposure of stereolithography process / Y.M. Huang, H.Y. Lan // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2006. – Vol. 27. – P. 1101–1112.

12. Jiang, C.P. Dynamic finite element analysis of photopolymerization in stereolithography / C.P. Jiang, Y.M. Huang, C.H. Liu // Rapid Prototyping Journal. – 2006. – Vol. 12, no. 3. – P. 173–180.

13. Stereolithography cure process modeling using acrylate resin / Y. Tang [et al.] // 2004 International Solid Freeform Fabrication Symposium. – 2004.

14. Projection micro-stereolithography using digital micro-mirror dynamic mask / C. Sun [et al.] // Sensors and Actuators A: Physical. – 2005. – Vol. 121, no. 1. – P. 113–120.

15. Lee, J.H. Cure depth in photopolymerization: Experiments and theory / J.H. Lee, R.K. Prud'Homme, I.A. Aksay // Journal of Materials Research. – 2001. – Vol. 16, no. 12. – P. 3536–3544.

16. Болотин, В.В. К теории вязкоупругости для структурно неустойчивых материалов / В.В. Болотин // Труды Московского энергетического института. Изд-во МЭИ. – 1972. – № 101. – С. 7–14.

17. Fedulov, B.N. Modeling of manufacturing of thermoplastic composites and residual stress prediction / B.N. Fedulov // Aerospace Systems. – 2018. – Vol. 1, no. 2. – P. 81–86.

18. Куликов, Р.Г. Численное исследование термомеханического поведения кристаллизующейся полимерной среды с учетом больших деформаций / Р.Г. Куликов, Т.Г. Куликова, О.Ю. Сметанников // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2018. – № 1. – С. 18–28.

19. Анализ параметров трещиностойкости на свободной границе в слоистых композитах / Д.А. Бондарчук [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2020. – № 4. – С. 49–59.

20. Residual stresses near the free edge of composite materials / B.N. Fedulov [et al.] // Acta Mechanica. – 2022. – Vol. 233, no. 2. – P. 417–435.

21. Lomakin, E.V. Influence of manufacturing shrinkage and microstructural features on the strength properties of carbon fibers/PEEK composite material / E.V. Lomakin, B.N. Fedulov, A.N. Fedorenko // Frattura e Integrita Strutturale. – 2022. – Vol. 62.

References

1. Huang, J., Qin, Q. and Wang, J., 2020. A review of stereolithography: Processes and systems. Processes, 8(9), p.1138.

2. Bychkov, P.S., Kozintsev, V.M., Manzhirov, A.V. and Popov, A.L., 2017. Determination of residual stresses in products in additive production by the layer-by-layer photopolymerization method. Mechanics of Solids, 52, pp.524-529.

3. Bugeda, G., Cervera, M., Lombera, G. and Onate, E., 1995. Numerical analysis of stereolithography processes using the finite element method. Rapid Prototyping Journal, 1(2), pp.13-23.

4. Huang, Y.M. and Jiang, C.P., 2003. Curl distortion analysis during photopolymerisation of stereolithography using dynamic finite element method. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 21, pp.586-595.

5. Chockalingam, K., Jawahar, N. and Chandrasekhar, U., 2006. Influence of layer thickness on mechanical properties in stereolithography. Rapid Prototyping Journal, 12(2), pp.106-113.

6. Ian Gibson, I.G., 2015. Additive manufacturing technologies 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing.

7. Huang, Y.M., Kuriyama, S. and Jiang, C.P., 2004. Fundamental study and theoretical analysis in a constrained-surface stereolithography system. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 24, pp.361-369.

8. Huang, Y.M. and Lan, H.Y., 2005. CAD/CAE/CAM integration for increasing the accuracy of mask rapid prototyping system. Computers in Industry, 56(5), pp.442-456.

9. Huang, Y.M., Jeng, J.Y. and Jiang, C.P., 2003. Increased accuracy by using dynamic finite element method in the constrain-surface stereolithography system. Journal of Materials Processing Technology, 140(1-3), pp.191-196.

10. Huang, Y.M. and Jiang, C.P., 2003. Numerical analysis of a mask type stereolithography process using a dynamic finite-element method. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 21, pp.649-655.

11. Huang, Y.M. and Lan, H.Y., 2006. Compensation of distortion in the bottom exposure of stereolithography process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 27, pp.1101-1112.

12. Jiang, C.P., Huang, Y.M. and Liu, C.H., 2006. Dynamic finite element analysis of photopolymerization in stereolithography. Rapid Prototyping Journal, 12(3), pp.173-180.

13. Tang, Y., Henderson, C.L., Muzzy, J. and Rosen, D.W., 2004, September. Stereolithography cure process modeling using acrylate resin. In 2004 International Solid Freeform Fabrication Symposium.

14. Sun, C., Fang, N., Wu, D.M. and Zhang, X., 2005. Projection micro-stereolithography using digital micro-mirror dynamic mask. Sensors and Actuators A: Physical, 121(1), pp.113-120.

15. Lee, J.H., Prud'Homme, R.K. and Aksay, I.A., 2001. Cure depth in photopolymerization: Experiments and theory. Journal of Materials Research, 16(12), pp.3536-3544.

16. Bolotin, V.V., 1972. K teorii vyazkouprugosti dlya strukturno neustoichivih materialov. Trudi Moskovskogo energeticheskogo instituta. Izd_vo MEI (101), pp.7-14.

17. Fedulov, B.N., 2018. Modeling of manufacturing of thermoplastic composites and residual stress prediction. Aerospace Systems, 1(2), pp.81-86.

18. Kulikov, R.G., Kulikova, T.G. and Smetannikov, O.Y., 2018. Numerical study of a thermomechanical behavior of a crystallizing polymer medium with regard to finite deformations. PNRPU Mechanics Bulletin, (1), pp.18-28.

19. Bondarchuk, D.A., Fedulov, B.N., Fedorenko, A.N. and Lomakin, E.V., 2020. Analysis of the fracture toughness parameters at the free edge in layered composites. PNRPU Mechanics Bulletin, (4), pp.49-59.

20. Fedulov, B.N., Bondarchuk, D.A., Fedorenko, A.N. and Lomakin, E.V., 2022. Residual stresses near the free edge of composite materials. Acta Mechanica, 233(2), pp.417-435.

21. Lomakin, E.V., Fedulov, B.N. and Fedorenko, A.N., 2022. Influence of manufacturing shrinkage and microstructural features on the strength properties of carbon fibers/PEEK composite material. Frattura e Integrita Strutturale, (62).

Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 20-11-20230.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Вклад автора 100 %.

Funding. The work was supported by the Russian Science Foundation grant No. 20-11-20230.

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

The contribution of the author 100 %.