

В. И. Струкова, А. А. Каменских, Ю. О. Носов, Д. О. Пустовалов

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ ФОТОПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия*

Аннотация. Объектом исследования являются фотополимерные смолы после отверждения. Материалы широко применяются при аддитивном выращивании прототипов для литья по выжигаемым моделям. Исследователями отмечается негативное влияние термического расширения прототипов из фотополимерных смол, что приводит к браку. Целью работы является построение вязкоупругой модели материала. Математическое описание поведения материалов направленное на прогнозирование напряжено-деформированного состояния объекта исследования при сложных технологических условиях. В первом приближении для описания поведения материала выбрана модель Максвелла на основе рядов Procu с использованием процедуры численной идентификации. В работе выполнено построение модели поведения Envisiontec SI500 на основе данных натурных экспериментов в диапазоне температур от 0 до 100 °С. Построены зависимости $E(T, \dot{T})$.

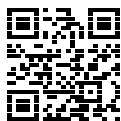
Ключевые слова: фотополимер, температура, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, Procu , термомеханика, эксперимент, процедура идентификации.

Струкова Вероника Ивановна, аспирант, ассистент кафедры вычислительной математики, механики и биомеханики; e-mail: veloiv_pstu@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0004-6241-4388>; AuthorID: 1097965

Каменских Анна Александровна, кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией цифрового инжиниринга машиностроительных процессов и производств; e-mail: anna_kamenskih@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3012-2418>; AuthorID: 641861

Носов Юрий Олегович, аспирант, научный сотрудник лаборатории цифрового инжиниринга машиностроительных процессов и производств; e-mail: ura.4132@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5736-8645>; AuthorID: 1050564

Пустовалов Дмитрий Олегович, старший преподаватель кафедры инновационные технологии машиностроения; e-mail: pustovalov.dmitrii@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1700-9856>; AuthorID: 654687



для цитирования: Струкова В. И., Каменских А. А., Носов Ю. О., Пустовалов Д. О. Термомеханическая модель поведения фотополимерного материала // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2025. № 1(63). С. 65–75. DOI: 10.37972/chgpu.2025.63.1.006. EDN: WQCBXU

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

V. I. Strukova, A. A. Kamenskikh, Yu. O. Nosov, D. O. Pustovalov

THERMOMECHANICAL MODEL OF PHOTOPOLYMER MATERIAL

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

Abstract. Photopolymer resins after curing are the subject of research. The materials are widely used in additive manufacturing of prototypes for casting on burnt model. The negative impact of thermal expansion of photopolymer resins prototypes made, which leads to defects is noted by researchers. The aim of the work is to construct a viscoelastic model of the material. The mathematical description of the materials behavior is aimed at predicting the stress-strain state of the research object under complex technological conditions. The Maxwell model on the basis of Prony series, is chosen to describe the material behavior in the first approximation. The author's numerical identification procedure is used to describe the material model. The Envisiontec SI500 behavior model construction was performed in the work based on data from experiments in the temperature range from 0 to 100 °C. The $E(T, \dot{T})$ dependencies are constructed.

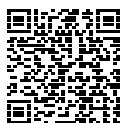
Keywords: photopolymer, temperature, Young's modulus, Poisson's ratio, Prony, thermomechanics, experiment, identification procedure.

Veronika I. Strukova, Postgraduate, Assistant; e-mail: veloiv_pstu@mail.ru;
<https://orcid.org/0009-0004-6241-4388>; AuthorID: 1097965

Anna A. Kamenskikh, Associate Professor; e-mail: anna_kamenskih@mail.ru;
<https://orcid.org/0000-0002-3012-2418>; AuthorID: 641861

Yuriy O. Nosov, Postgraduate, Researcher,; e-mail: ura.4132@yandex.ru;
<https://orcid.org/0000-0002-5736-8645>; AuthorID: 1050564

Dmitry O. Pustovalov, Senior Lecturer; e-mail: pustovalov.dmitrii@inbox.ru;
<https://orcid.org/0000-0003-1700-9856>; AuthorID: 654687



to cite this article: Strukova V. I., Kamenskikh A. A., Nosov Yu. O., Pustovalov D. O. Thermomechanical model of photopolymer material // Vestn. Chuvash. Gos. Ped. Univ. im. I.Ya. Yakovleva Ser.: Mekh. Pred. Sost. 2025. No 1(63). p. 65–75. DOI: 10.37972/chgpu.2025.63.1.006

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение. Литейные технологии широко используются для производства машиностроительных и авиационных деталей при крупносерийном и мелкосерийном производстве [1, 2]. Качество изделия во многом зависит от формы, в которую происходит заливка расплава, и технологий ее получения [3]. Временные и экономические затраты на производство твердой оснастки или пресс-форм являются сдерживающим фактором для отработки технологического процесса при изготовлении опытных деталей [2]. Аддитивные технологии внедряются при печати песком литейных форм [6], литье по выплавляемым и выжигаемым моделям [7] и прецизионном литье [8] для быстрого создания формы требуемого качества. Внедрение в литейные технологические процессы методов и средств аддитивных технологий является передовым направлением развития, направленным на увеличение гибкости и эффективности технологических процессов литья [3, 4]. А также создание сложных, в том числе и тонкостенных геометрических объектов [5]. Одним из наиболее перспективных технологических решений для быстрого прототипирования является процесс литья по выжигаемым моделям. Упрощенная схема технологического процесса представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема технологического процесса литья по выжигаемым моделям

Физико-механические, технологические, реакционные и эксплуатационные свойства фотополимеров оказывают влияние на качество поверхности литого изделия на I-V этапах в части морфологии и шероховатости. Основное влияние термомеханики материала на технологический процесс наблюдается на VI этапе, когда происходит выплавление фотополимерной модели для получения литейной формы из гипса или мелкодисперсного кварца. Исследователями отмечаются большие деформации фотополимерного материала в процессе выжигания [9]. Данный эффект приводит к появлению микро- и макро-трещин и выбраковке формы [10, 11]. На последних этапах технологического процесса морфология фотополимерного прототипа остаточно влияет на качество изделия, полученного при помощи литья. Для снижения негативного эффекта

рассматриваются ячеистые структуры разной геометрии [6, 12], изменение рецептуры материалов [13], исследования влияния технологических режимов [3] и т.д. Но для рационализации технологических процессов требуется применение методов математического моделирования и предиктивной аналитики, в том числе для создания численных моделей поведения материалов [14, 15].

Термомеханические свойства фотополимерного материала. В данной работе рассмотрена задача, связанная с описанием модели поведения фотополимерного материала на основе соотношений термовязкоупругости с использованием численной процедуры идентификации, ранее подтвердившая свою функциональность при описании смазочных и полимерных материалов [16]. В первом приближении в качестве материала исследования выбран фотополимер Envisiontec SI500 (EnvisionTec Inc., Ferndale, Michigan) [15]. Работа направлена на адаптацию алгоритмов, а также оценку возможности описания фотополимерных материалов как тела Максвелла с использованием рядов Prony. В рамках исследования выполнено имитационное моделирование DMA-эксперимента при нагреве цилиндрических образцов 3×7 и 4×9 мм при $T \in [0; 100]$ °C с разной скоростью нагрева $\dot{T} \in [5; 15]$ °C/мин при одноосном деформировании образца $u_z = 0,005l$. Эксперимент позволяет определить зависимости механических характеристик материалов от температуры (времени, частоты) при действии на образец осциллирующей силы. На рис. 2 представлены зависимости физико-механических свойств материала от температуры: модуль Юнга, модуль сдвига, коэффициент Пуассона. Данные получены осреднением результатов экспериментальной выборки.

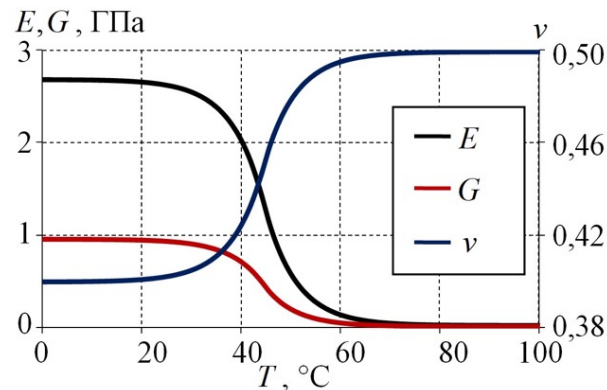


Рис. 2. Зависимость физико-механических свойств фотополимерного материала Envisiontec SI500 от температуры

Вязкоупругая модель поведения материала на основе рядов Prony. Для описания поведения материала используются ряды Prony в связке с моделью температурно-временной аналогии Вильямса-Ландела-Ферри

(WLF), позволяющие описать поведение материала на широком диапазоне температур. Связь напряжения и деформации имеет вид (1):

$$\sigma_{ij}(t) = \int_0^t 2G(t-\tau) \frac{e_{ij}(\tau)}{d\tau} d\tau + \int_0^t K(t-\tau) \frac{\theta_{ij}(\tau)}{d\tau} d\tau, \quad (1)$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; e_{ij} – компоненты девиатора деформаций; G – модуль сдвига; K – модуль объемного сжатия; θ_{ij} – компоненты тензора объемных деформаций. В рамках экспериментального исследования определена зависимость модуля Юнга от времени. Для возможности описания свойств фотополимерного материала рядами Prony, проведем ряд преобразований. При постоянстве модуля объемного сжатия K зависимость коэффициента Пуассона от времени будет выглядеть следующим образом:

$$\nu(t) = \frac{3K - E(t)}{6K}. \quad (2)$$

Получив зависимость коэффициента Пуассона от времени, перейдем к описанию модуля сдвига от времени:

$$G(t) = \frac{E(t)}{2(1 - \nu(t))}. \quad (3)$$

Общий вид модуля сдвига в зависимости от времени, при описании рядами Prony имеет вид:

$$G(t) = G_\infty + G_0 \sum_{i=1}^n \alpha_i e^{\frac{-t}{\beta_i}}. \quad (4)$$

где G_∞ – сдвиговой модуль в конечный момент времени; G_0 – сдвиговой модуль в начальный момент времени; α_i – весовые коэффициенты; β_i – времена релаксации.

Для описания влияния температуры на вязкоупругие характеристики материала используется температурно-временная аналогия:

$$A_{WLF}(T) = 10^{\frac{C_1(T-T_r)}{C_2+(T-T_r)}}, \quad (5)$$

где C_1, C_2 – эмпирические постоянные материала; T – текущая температура; T_r – постоянная базовая температура.

Связь между временем и температурно-временной аналогией используется при учете времен релаксации:

$$\beta'_i = \frac{\beta_i}{A_{WLF}(T)}. \quad (6)$$

Вектор неизвестных $\bar{x} = \{\beta_i, \alpha_i, T_r, C_1, C_2\}$ определяется на основе (4) и (5) с использованием многопараметрического итерационного алгоритма оптимизации Нелдера-Мида. Остановка итерационной процедуры завершалась при достижении погрешности менее 5 %.

На рис. 3 представлены параметры ряда Prony для Envisiontec SI500 и связь между весовыми коэффициентами и временами релаксации.

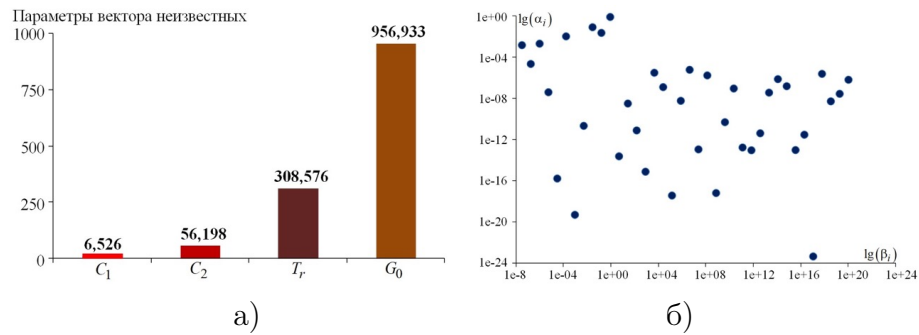


Рис. 3. Вязкоупругая модель поведения Envisiontec SI500 на основе рядов Prony: а – параметры вектора неизвестных; б – зависимость весовых коэффициентов от времен релаксации

Всего для описания термовязкоупругого поведения фотополимерного материала потребовалось определить 40 пар коэффициентов $\alpha_i - \beta_i$. Вязкоупругая модель поведения фотополимерного материала построена на основе уравнений максвелловского типа. Эта модель которая была верифицирована на имитационной модели повторяющей DMA-эксперимент.

Для анализа отличий численного и натурального эксперимента определяется $\delta = (A_{exp} - A_{num}) / A_{exp} \cdot 100\%$, где A_{exp} – экспериментальные данные, A_{num} – данные полученные в рамках вычислительных процедур, A – параметр физико-механических свойств материала (E , G , ν).

На рис. 4 представлена зависимость физико-механических свойств фотополимера от температуры и расхождение результатов для натурального и численного эксперимента.

Характер зависимости физико-механических свойств материала при натурном и численном экспериментах имеет малые отличия. Расхождение данных натурального и численного эксперимента по E и G до температуры стеклования $35,329^\circ\text{C}$, определенной в рамках процедуры идентификации, менее 5 %. При температурах выше температуры стеклования наблюдаются значительные отличия E и G натурального и численного эксперимента до 90 %. Это может быть связано с некорректностью или отсутствием полных данных экспериментальных исследований в открытых источниках. Расхождение коэффициента Пуассона достигает 20-25 %, максимальное абсолютное значение погрешности составляет 0,099. Требуется экспериментальные исследования, направленные на определение температуры стеклования материала.

По результатам серии численных экспериментов построены зависимости $E(T, \dot{T})$ (рис. 5). Отличия модулей Юнга, полученных для образцов разной величины, не превышают 0,08 % (рис. 5, б).

На рис. 6 представлены зависимости модуля Юнга от скорости нагрева образца при разных температурах.

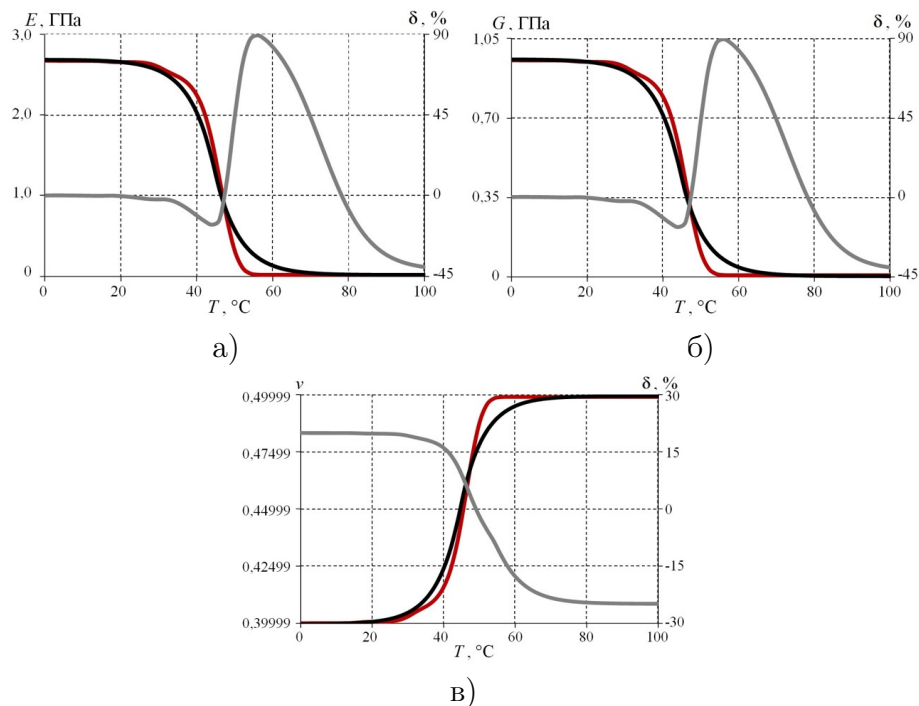


Рис. 4. Зависимость физико-механических свойств фотополимера от температуры: а – модуль Юнга; б – модуль сдвига; в – коэффициент Пуассона; красная линия – численный эксперимент; черная линия – натурный эксперимент; серая линия – δ

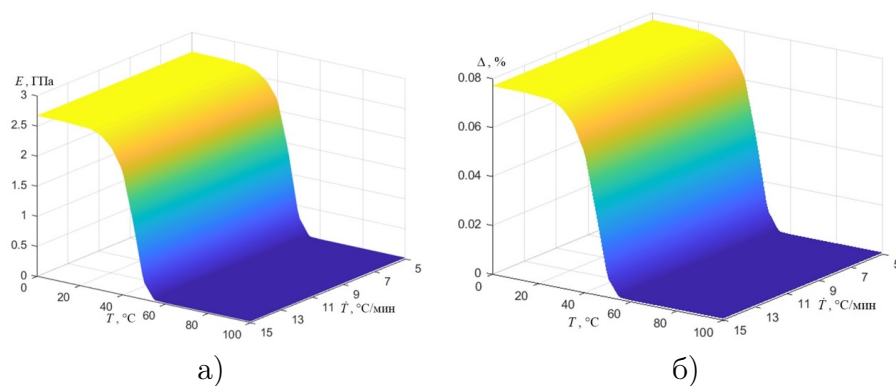


Рис. 5. Результаты имитации DMA-эксперимента: а – зависимость модуля Юнга от температуры и скорости нагрева, образец 3×7 мм; б – отличия модуля Юнга образцов 3×7 и 4×9 мм

Зависимости модуля Юнга от скорости нагрева образца при температурах менее 60 °C может быть описана полиномом второй степени, при температурах более 60 °C зависимость близка к линейной. Математическая зависимость $E(\dot{T})$,

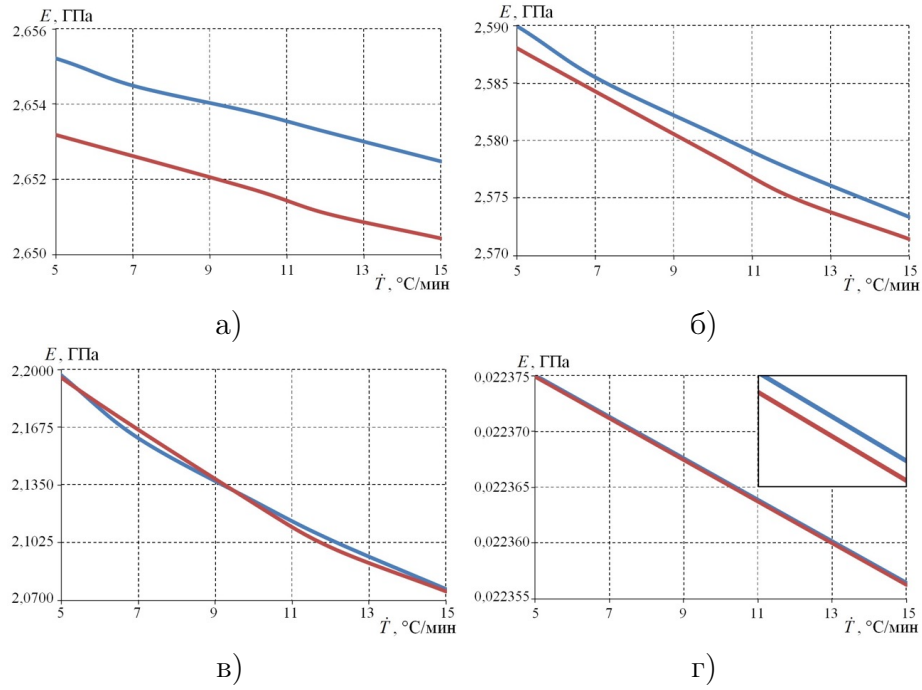


Рис. 6. Зависимость модуля Юнга от скорости нагрева образца при разных температурах: а – 20 °C; б – 30 °C; в – 40 °C; г – 100 °C; синяя линия – образец 3×7 мм; красная линия – образец 4×9 мм

полученная методом наименьших квадратов, для образцов 3×7 мм при разных температурах:

$$\begin{cases} E(\dot{T})|_{T=20^{\circ}C} = 0,0028\dot{T}^2 - 0,3224\dot{T} + 2656,7 \\ E(\dot{T})|_{T=30^{\circ}C} = 0,0388\dot{T}^2 - 2,4102\dot{T} + 2600,8 \\ E(\dot{T})|_{T=40^{\circ}C} = 0,4875\dot{T}^2 - 21,626\dot{T} + 2291,9 \\ E(\dot{T})|_{T=100^{\circ}C} = -0,0019\dot{T} + 22,384 \end{cases} \quad (7)$$

Для проверки (7) была проведена серия вычислительных экспериментов со скоростями нагрева менее 5 и более 15 °C/мин. Расхождение модулей Юнга, полученных по формулам, от численного решения методом конечных элементов, не превышает 0,2 %.

Заключение. Модель тела Максвелла подходит для описания поведения фотополимерных материалов в рамках термомеханики. Для качественного построения модели требуются данные серии натурных экспериментов в рамках

ДМА-анализа, а также экспериментально определенная температура стеклования.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. В. И. Струкова написание текста рукописи, проведение экспериментов, А. А. Каменских написание текста рукописи, согласование финальной версии рукописи, Ю. О. Носов проведение экспериментов, Д. О. Пустовалов обзор литературы по теме статьи, редактирование текста рукописи.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Материалы получены в рамках программы развития передовой инженерной школы «Высшая школа авиационного двигателестроения» ПНИПУ г. Пермь.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. V. I. Strukova writing the manuscript text, conducting experiments, A. A. Kamenskikh writing the manuscript text, approving the final version of the manuscript, Yu. O. Nosov conducting experiments, D. O. Pustovalov reviewing the literature on the article topic, editing the manuscript text.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding. The materials were obtained within the framework of the development program of the advanced engineering school "Higher School of Aviation Engine Building" of PNRPU in Perm.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Форостович Т. Л., Нарский А. Р., Битюцкая О. Н., Мокеев Н. А. Гранулирование модельных композиций производства НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ для литья по выплавляемым моделям // Труды ВИАМ. 2024. № 7(137). Ст. 01. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-3-11.
- [2] Gao M., Li L., Wang Q., Ma Z., Li X., Liu Z. Integration of Additive Manufacturing in Casting: Advances, Challenges, and Prospects // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology. 2022. Vol. 9. P. 305–322. <https://doi.org/10.1007/s40684-021-00323-w>.
- [3] Rodríguez-González P., Zapico P., Peláez-Peláez S., Castro-Sastre M. Á., Fernández-Abia A. I. Optimizing the Material Extrusion Process for Investment Casting Mould Production // Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2024. Vol. 8(6). Art. 265. <https://doi.org/10.3390/jmmp8060265>.
- [4] Никитин К. В., Дьячков В. Н., Харченко С. В., Юдин Д. М., Юдина К. А. Особенности применения SLA-технологии при изготовлении пресс-форм для литья по выплавляемым моделям // Литье и металлургия. 2024. № 3. С. 37–40. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-3-37-40>.
- [5] Mukhtarkhanov M., Perveen A., Talamona D. Application of Stereolithography Based 3D Printing Technology in Investment Casting // Micromachines. 2020. Vol. 11(10). Art. 946. <https://doi.org/10.3390/mi1100946>.
- [6] Lynch P., Hasbrouck C., Wilck J., Kay M., Manogharan G. Challenges and opportunities to integrate the oldest and newest manufacturing processes: Metal casting and additive manufacturing // Rapid Prototyping Journal. 2020. Vol. 26. P. 1145–1154. <https://doi.org/10.1108/RPJ-10-2019-0277>.
- [7] Равочкин А. С., Чибирнова Ю. В. Верификация численных методов моделирования литья по выплавляемым моделям для отливок газотурбинных двигателей в программе

- LVMFlow // Заготовительные производства в машиностроении. 2022. Т. 20, № 11. С. 488–492. DOI 10.36652/1684-1107-2022-20-11-488-492.
- [8] Гильманшина Т. Р., Усков И. В., Беляев С. В., Баранов В. Н., Усков Д. И., Богданова Т. А. Изготовление соляных стержней для получения прецизионных отливок // Литейное производство. 2014. № 8. С. 17–20.
- [9] Евстигнеев А. И., Евстигнеева А. А., Дмитриев Э. А., Иванкова Е. П., Одинокое В. И., Чернышова Д. В. О силовом влиянии опорного наполнителя и межслойного трения на напряженное состояние керамической оболочковой формы по выплавляемым моделям // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2023. № 1(55). С. 33–45. DOI 10.37972/chgpu.2023.55.1.005.
- [10] Basar O., Veliyath V. P., Tarak F., Sabet E. A Systematic Study on Impact of Binder Formulation on Green Body Strength of Vat-Photopolymerisation 3D Printed Silica Ceramics Used in Investment Casting // Polymers. 2023. Vol. 15(14). Art. 3141. <https://doi.org/10.3390/polym15143141>.
- [11] Okoruwa L., Tarak F., Sameni F., Sabet E. Bridging Experimentation and Computation: OMSP for Advanced Acrylate Characterization and Digital Photoresin Design in Vat Photopolymerization // Polymers. 2025. Vol. 17(2). Art. 203. <https://doi.org/10.3390/polym17020203>.
- [12] Richard C. T., Kwok T.-H. Analysis and Design of Lattice Structures for Rapid-Investment Casting // Materials. 2021. Vol. 14(17). Art. 4867. <https://doi.org/10.3390/ma14174867>.
- [13] Alberto J. R., Garg S., Streeter S. S., Giallorenzi M. K., LaRochelle E. P. M., Samkoe K. S., Pogue B. W. 3D printing fluorescent material with tunable optical properties // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. Art. 17135.
- [14] Захаров С. К., Анцев А. В., Калабин И. Д. Анализ причин возникновения брака при литье по выплавляемым моделям с использованием системы компьютерного моделирования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 8. С. 185–189. DOI 10.24412/2071-6168-2024-8-185-186.
- [15] Сметанников О. Ю., Самусев И. В. Экспериментальная идентификация параметров определяющих соотношений для фотополимерного композита // Механика композиционных материалов и конструкций. 2013. Т. 19, № 1. С. 105–116.
- [16] Nosov Y. O., Kamenskikh A. A. Experimental study of the rheology of grease by the example of CIATIM-221 and identification of its behavior Model // Lubricants. 2023. Vol. 11. Art. 295. <https://doi.org/10.3390/lubricants11070295>.

REFERENCES

- [1] Forostovich T. L., Narsky A. R., Bitvutskaya O. N., Mokeyev N. A. Granulation of model compositions produced by National Research Center «Kurchatov Institute» – VIAM for castings on smelted models // Trudy VIAM. 2024. № 7(137). Art. 01. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-3-11. (in Russian)
- [2] Gao M., Li L., Wang Q., Ma Z., Li X., Liu Z. Integration of Additive Manufacturing in Casting: Advances, Challenges, and Prospects // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology. 2022. Vol. 9. P. 305–322. <https://doi.org/10.1007/s40684-021-00323-w>.
- [3] Rodríguez-González P., Zapico P., Peláez-Peláez S., Castro-Sastre M. Á., Fernández-Abia A. I. Optimizing the Material Extrusion Process for Investment Casting Mould Production // Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2024. Vol. 8(6). Art. 265. <https://doi.org/10.3390/jmmp8060265>.
- [4] Nikitin K. V., Dyachkov V. N., Kharchenko S. V., Yudin D. M., Yudina K. A. Features of Using Sla-Technology in the Manufacture of Molds for Lost Wax Casting // Foundry production

- and metallurgy. 2024. № 3. С. 37–40. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-3-37-40>. (in Russian)
- [5] Mukhtarkhanov M., Perveen A., Talamona D. Application of Stereolithography Based 3D Printing Technology in Investment Casting // *Micromachines*. 2020. Vol. 11(10). Art. 946. <https://doi.org/10.3390/mi11100946>.
- [6] Lynch P., Hasbrouck C., Wilck J., Kay M., Manogharan G. Challenges and opportunities to integrate the oldest and newest manufacturing processes: Metal casting and additive manufacturing // *Rapid Prototyping Journal*. 2020. Vol. 26. P. 1145–1154. <https://doi.org/10.1108/RPJ-10-2019-0277>.
- [7] Ravochkin A. S., Chibirnova Yu. V. Verification of Numerical Methods for Modeling of Investment Casting for Gas Turbine Engines Castings in Program LVMFlow // *Procurement production in mechanical engineering*. 2022. T. 20, № 11. С. 488–492. DOI 10.36652/1684-1107-2022-20-11-488-492. (in Russian)
- [8] Gilmanshina T. R., Uskov I. V., Belyaev S. V., Baranov V. N., Uskov D. I., Bogdanova T. A. Making Salt Cores in Precision Casting Production // *Soviet Castings Technology*. 2014. № 8. С. 17–20. (in Russian)
- [9] Odinov V. I., Dmitriev E. A., Evstigneev A. I., Evstigneeva A. A., Ivankova E. P., Chernyshova D. V. On the Force Effect of the Support Filler and Interlayer Friction on the Stress State of a Multilayer Shell Mold during Casting According to Smelted Models // *Vestnik of the Yakovlev Chuvash State Pedagogical University. Series: Mechanics of Limit State*. 2023. № 1(55). С. 33–45. DOI 10.37972/chgpu.2023.55.1.005. (in Russian)
- [10] Basar O., Veliyath V. P., Tarak F., Sabet E. A Systematic Study on Impact of Binder Formulation on Green Body Strength of Vat-Photopolymerisation 3D Printed Silica Ceramics Used in Investment Casting // *Polymers*. 2023. Vol. 15(14). Art. 3141. <https://doi.org/10.3390/polym15143141>.
- [11] Okoruwa L., Tarak F., Sameni F., Sabet E. Bridging Experimentation and Computation: OMSP for Advanced Acrylate Characterization and Digital Photoresin Design in Vat Photopolymerization // *Polymers*. 2025. Vol. 17(2). Art. 203. <https://doi.org/10.3390/polym17020203>.
- [12] Richard C. T., Kwok T.-H. Analysis and Design of Lattice Structures for Rapid-Investment Casting // *Materials*. 2021. Vol. 14(17). Art. 4867. <https://doi.org/10.3390/ma14174867>.
- [13] Alberto J. R., Garg S., Streeter S. S., Giallorenzi M. K., LaRochelle E. P. M., Samkoe K. S., Pogue B. W. 3D printing fluorescent material with tunable optical properties // *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. Art. 17135.
- [14] Zakharov S. K., Antsev A. V., Kalabin I. D. Analysis of the Causes of Defects in Investment Casting Using a Computer Simulation System // *Izvestiya Tula State University. Technical sciences*. 2024. № 8. С. 185–189. DOI 10.24412/2071-6168-2024-8-185-186. (in Russian)
- [15] Smetannikov O. Y., Samusev I. V. Experimental Identification of Constitutive Equations Parameters For Photopolymer Composite // *Journal on Composite Mechanics and Design*. 2013. T. 19, № 1. С. 105–116. (in Russian)
- [16] Nosov Y. O., Kamenskikh A. A. Experimental study of the rheology of grease by the example of CIATIM-221 and identification of its behavior Model // *Lubricants*. 2023. Vol. 11. Art. 295. <https://doi.org/10.3390/lubricants11070295>. (in Russian)