

А. В. Ткачева¹, А. А. Евстигнеева²

ОБ ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ СТЕПЕНИ ОХВАТА ОПОРНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ СФЕРИЧЕСКОЙ КЕРАМИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПРОКАЛКИ НА УРОВЕНЬ НАПРЯЖЕНИЙ В МАТЕРИАЛЕ ФОРМЫ ПРИ ЗАЛИВКЕ И ЗАТВЕРДЕВАНИИ В НЕЙ ОТЛИВКИ

¹*Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН Хабаровского федерального исследовательского центра, Комсомольск-на-Амуре, Россия*

²*Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре, Россия*

Аннотация. Рассчитываются температурные напряжения в сферической керамической оболочковой форме в процессе заливки и затвердевания металла. Поставлена и решена соответствующая задача теории температурных напряжений в упругих материалах. Изменяемыми параметрами задачи принимаются степень разогрева (прокалки) оболочковой формы и высота ее посадки в опорный наполнитель (ОН). Зависимостью упругих модулей от температуры пренебрегается. В качестве контактных условий на границе контактирующего металла с внутренней поверхностью формы принимаются равенства напряжений нормальных и касательных к граничной поверхности. ОН принимается не деформируемым, его контакт с материалом оболочковой формы полагается жестким. Отмечается незначительное увеличение уровня напряжений в форме за счет присутствия опорного наполнителя и заметное влияние на него предварительного ее нагрева.

Ключевые слова: упругость, температурные напряжения, литье по выплавляемым моделям, оболочковая форма.

Ткачева Анастасия Валерьевна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории проблем создания и обработки материалов и изделий; e-mail: 4nansi4@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1795-0021>; AuthorID: 644039

Евстигнеева Анна Алексеевна, студент кафедры прикладной математики; e-mail: annka.ewstic@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0667-2468>; AuthorID: 1183470

для цитирования: Ткачева А. В., Евстигнеева А. А. Об оценке влияния степени охвата опорным наполнителем сферической керамической оболочки и предварительной прокалки на уровень напряжений в материале формы при заливке и затвердевании в ней отливки // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2024. № 2(60). С. 24–34. DOI: 10.37972/chgpu.2024.60.2.002 EDN: YGLJBE

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

A. V. Tkacheva¹, A. A. Evstigneeva²

**ON ASSESSING THE INFLUENCE OF THE DEGREE OF
COVERAGE OF A SPHERICAL CERAMIC SHELL BY THE
SUPPORTING FILLER AND PRELIMINARY CALCINATION ON
THE LEVEL OF STRESS IN THE MOLD MATERIAL DURING
POURING AND HARDENING OF THE CASTING IN IT**

¹*Institute of Mechanical Science and Metallurgy, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk Federal Research Center, Komsomolsk-on-Amur, Russia*

²*Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia*

Abstract. Thermal stresses in a spherical ceramic shell mold are calculated during the process of pouring and solidifying the metal. The corresponding problem of the theory of temperature stresses in elastic materials is formulated and solved. The variable parameters of the problem are the degree of heating (calcination) of the shell mold and the height of its seating in the support filler (SF). The dependence of elastic moduli on temperature is neglected. As contact conditions at the boundary of the contacting metal with the inner surface of the mold, the equality of stresses normal and tangential to the boundary surface is taken. OH is assumed to be non-deformable, its contact with the shell-shaped material is assumed to be rigid. There is a slight increase in the level of stress in the mold due to the presence of the supporting filler and a noticeable influence on it from its preliminary heating.

Keywords: elasticity, temperature stresses, lost wax casting, shell form.

Anastasia V. Tkacheva, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher at the Laboratory of Problems of Creation and Processing of Materials and Products, e-mail: 4nansi4@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1795-0021>, AuthorID: 644039

Anna A. Evstigneeva, student of the Department of Applied Mathematics, e-mail: annka.ewstic@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0667-2468>; AuthorID: 1183470

to cite this article: Tkacheva A. V., Evstigneeva A. A. On assessing the influence of the degree of coverage of a spherical ceramic shell by the supporting filler and preliminary calcination on the level of stress in the mold material during pouring and hardening of the casting in it // Vestn. Chuvash. Gos. Ped. Univ. im. I.Ya. Yakovleva Ser.: Mekh. Pred. Sost. 2024. No 2(60). p. 24–34. DOI: 10.37972/chgpu.2024.60.2.002 EDN: YGLJBE

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

1. Введение В производстве и технике часто встречаются детали в виде сферы. Получение шаровой заготовки с помощью литья по выплавляемым моделям, экономически выгодней, чем при обработке металла давлением. Поэтому в этой области проведено много исследований [1–13], направленных на улучшение процесса формирования отливки. В ряде работ изучалось влияние геометрии оболочкой формы на ее напряжённо-деформированное состояние (НДС) [1–3], толщины стенки керамики [4–9], материала отливок [10, 11] и материала оболочковой формы [12]. Поскольку керамическая оболочка деформируется упруго, то о ее способности выдержать нагрузку, исходящую от заливаемого металла, можно судить по уровню и характеру возникающих напряжений, учитывая при этом, что сжимающие напряжения предпочтительнее растягивающих. В данной работе исследуется влияние, оказываемое со стороны ОН, на напряжения, возникающие в процессе затвердевания металла в сферической керамической оболочковой форме. Для этой цели рассматривается различный уровень погружения оболочкой формы в опорный наполнитель. Наряду с этим изучается также влияние предварительного подогрева (прокалки) формы.

Образуемый в ходе распределения температуры и охлаждения металл и керамическую форму считаем упругими, деформацию малой. Соотношение Дюамеля-Неймана описывает связь между напряжением упругой деформацией и температурой

$$\sigma_{ij} = (\lambda e_{kk} - 3\alpha K (T - T_0)) \delta_{ij} + 2\mu e_{ij}, \quad (1)$$

λ , μ , $K = \frac{2}{3}\mu + \lambda$ упругие модули, α – коэффициент линейного температурного расширения.

Полагаем, что температура не зависит от скорости деформаций, и распространяется благодаря закону Фурье

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) \quad (2)$$

λ – теплопроводность В/(Вт $^\circ$ С), c – удельная теплоемкость Дж/(кг $^\circ$ С), ρ – плотность кг/м 3 .

Зависимостью упругих модулей и теплофизических характеристик пренебрегаем. Дополняет систему уравнений (1, 2) уравнение равновесия

$$\sigma_{ij,j} = 0. \quad (3)$$

2. Постановка задачи. В сферическую керамическую оболочковую форму, размерами ($R \leq r \leq R_s$), прогретую до температуры T_*° С заливают расплавленную сталь температурой $T = 1550^\circ$ С. Следует найти распределение напряжений в течении времени кристаллизации металла. Введем сферическую систему координат (r, φ, θ) и свяжем ее с центром формы, которая может

быть как в свободном состоянии, так и помещена в опорный наполнитель частично или полностью (рис. 1). Примем сферу сплошной, полагая, что наличием воронки в материале оболочковой формы можно пренебречь. Распределение температуры $T(r, t)$ для каждого момента времени t определяется из решения уравнения теплопроводности

$$\frac{\partial T(r, \theta, t)}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial r^2} (r^2 T(r, \theta, t)) + \frac{1}{r^2 \sin(\theta)} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin(\theta) \frac{\partial}{\partial \theta} T(r, \theta, t) \right) \right) \quad (4)$$

совместно с начальными

$$T(r, 0) = 1550^\circ C \text{ для } r \in [0 \ R_s]; T(r, \theta, 0) = T_*^\circ C \text{ для } r \in [R_s \ R] \quad (5)$$

и граничными условиями:

в центре сферы $\frac{\partial T(r, \theta, t)}{\partial r} = 0$ для $r = 0$

на поверхности контакта между твердой фазой и керамической оболочкой $r = R$

$$\begin{cases} -\lambda_1 \frac{\partial T^{<1>}(R, \theta, t)}{\partial r} = -\lambda_2 \frac{\partial T^{<2>}(R, \theta, t)}{\partial r}; \\ T^{<1>}(R, \theta, t) = T^{<2>}(R, \theta, t) \end{cases} \quad (6)$$

на границе жидкой и твердой фазы $r = G(t)$

$$\begin{cases} -\lambda_2 \frac{\partial T^{<2>}(G, \theta, t)}{\partial r} = -\lambda_3 \frac{\partial T^{<3>}(G, \theta, t)}{\partial r} + \frac{\partial \Delta}{\partial t} L \rho_*; \\ T^{<2>}(G, \theta, t) = T^{<3>}(G, \theta, t) \end{cases} \quad (7)$$

в случае опорного наполнителя $\beta_* \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$

$$\frac{\partial T(R_s, \theta, t)}{\partial r} = 0 \quad (8)$$

для свободной поверхности $0 \leq \theta \leq \beta_*$

$$-\lambda_2 \frac{\partial T(R_s, \theta, t)}{\partial r} = k(T(R_s, \theta, t) - T^e) \quad (9)$$

на плоскости симметрии $\theta = 0, \theta = \frac{\pi}{2}$

$$\frac{\partial T(r, \theta, t)}{\partial \theta} = 0; \quad (10)$$

В приведённых выше соотношениях $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – коэффициенты теплопроводности; k – коэффициент теплообмена керамической оболочки с окружающей средой; β – угол погружения формы в ОН; L – скрытая удельная теплота кристаллизации; ρ – плотность металла.

Решение температурной задачи (4-10) проводим численно методом прогонки.

Деформации в сферической системе координат зависят только от перемещений $u_r(r, \theta, t)$ и $u_\theta(r, \theta, t)$ потому, что по координате φ симметрично, а следовательно, по φ нет перемещений,

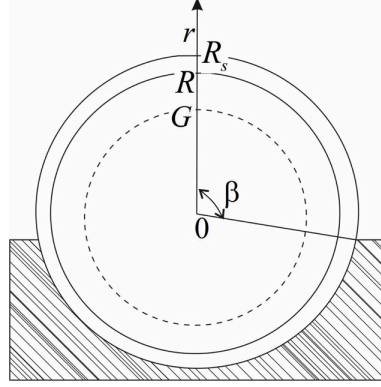


Рис. 1 Схема задачи

$$e_{rr} = u_{r,r}, e_{\theta\theta} = \frac{1}{r} (u_{\theta,\theta} + u_r), e_{\varphi\varphi} = u_{\theta} \frac{1}{r} \operatorname{ctg}(\theta) + u_r \frac{1}{r}, \quad (11)$$

$$e_{r\theta} = 0.5 \left(u_{\theta,r} - \frac{1}{r} u_{\theta} + \frac{1}{r} u_{r,\theta} \right), e_{r\varphi} = e_{\varphi\theta} = 0.$$

Подставляя (11) в (1) перепишем соотношения Дюамеля-Неймана в сферической системе координат для нашего случая

$$\sigma_{rr} = (\lambda + 2\mu) u_{r,r} + \lambda \frac{1}{r} (u_{\theta,\theta} + 2u_r + u_{\theta} \operatorname{ctg}(\theta)) - 3K\alpha (T - T_0);$$

$$\sigma_{\theta\theta} = (\lambda + 2\mu) \frac{1}{r} (u_{\theta,\theta} + u_r) + \lambda \left(u_{r,r} + \frac{1}{r} u_r + \frac{1}{r} u_{\theta} \operatorname{ctg}(\theta) \right) - 3K\alpha (T - T_0); \quad (12)$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = (\lambda + 2\mu) \frac{1}{r} (u_{\theta} \operatorname{ctg}(\theta) + u_r) + \lambda \left(u_{r,r} + \frac{1}{r} u_r + \frac{1}{r} u_{\theta,\theta} \right) - 3K\alpha (T - T_0);$$

$$\sigma_{r\theta} = \mu \left(u_{\theta,r} - \frac{1}{r} u_{\theta} + \frac{1}{r} u_{r,\theta} \right).$$

Уравнение равновесия

$$\sigma_{r,r} + \frac{1}{r} \sigma_{r\theta,\theta} + \frac{1}{r} (2\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta} - \sigma_{\varphi\varphi} - \sigma_{r\theta} \operatorname{ctg}(\theta)) = 0, \quad (13)$$

$$\sigma_{r\theta,r} + \frac{1}{r} \sigma_{\theta,\theta} + \frac{1}{r} ((\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{\varphi\varphi}) \operatorname{ctg}(\theta) + 3\sigma_{r\theta}) = 0.$$

Для решения уравнения равновесия (13) запишем граничные условия: на границе жидкой и твердой фазы $r = G(t)$

$$\begin{cases} \sigma_{rr}^{<1>} = -p; & p = \rho gh \\ \sigma_{r\theta}^{<1>} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

на поверхности контакта между твердой фазой и керамической оболочкой $r = R$

$$\begin{cases} \sigma_{rr}^{<1>} = \sigma_{rr}^{<2>} \\ \sigma_{r\theta}^{<1>} = \sigma_{r\theta}^{<2>} \\ u_r^{<1>} = u_r^{<2>} \\ u_\theta^{<1>} = u_\theta^{<2>} \end{cases} \quad (15)$$

для свободной поверхности $0 \leq \theta \leq \beta_*$

$$\begin{cases} \sigma_{rr}^{<2>} = 0; \\ \sigma_{r\theta}^{<2>} = 0 \end{cases} \quad (16)$$

в случае опорного наполнителя $\beta_* \leq \theta \leq \pi$

$$\begin{cases} u_r^{<2>} = 0 \\ u_\theta^{<2>} = 0 \end{cases} \quad (17)$$

на плоскости симметрии $\theta = 0, \theta = \pi$

Уравнения (13-17) представляем в перемещениях и решаем полученную систему линейных уравнений одним из возможных численных методов: простых итераций либо Гаусса.

3. Обсуждение результатов Принятые физико-механические характеристики сред:

для жидкого металла плотность 7800 кг/м^3 , теплоемкость $900 \text{ Дж/(кг}^\circ\text{C)}$, скрытая удельная теплота кристаллизации $270 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$, коэффициент теплопроводности $2,98 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$

для твердого металла плотность 7860 кг/м^3 , теплоемкость $460 \text{ Дж/(кг}^\circ\text{C)}$, коэффициент теплопроводности $29 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$, коэффициент линейного расширения $11,0 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, параметры Ламе $\lambda = 121,1 \text{ ГПа}$, $\mu = 80,7 \text{ ГПа}$

для оболочковой формы плотность 2000 кг/м^3 , теплоемкость $840 \text{ Дж/(кг}^\circ\text{C)}$, коэффициент теплопроводности $0,812 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$, коэффициент линейного расширения $0,51 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, параметры Ламе $\lambda = 172,6 \text{ ГПа}$, $\mu = 259,0 \text{ ГПа}$.

Рассмотрим процесс деформирования керамической формы в течение времени затвердевания залитого жидкого металла. При размерах внешнего радиуса $0,05 \text{ м}$ толщиной $0,005 \text{ м}$ это займет не более двух минут. Разбивая временной интервал на малые временные промежутки, произведем расчет поставленной задачи.

Рассмотрим случай, когда оболочка перед заливкой металла разогрета до температуры $800 \text{ }^\circ\text{C}$. На рис. 2 показано движение границы, разделяющей жидкую фазу от твердой, как видно это не линейное движение с запаздыванием на границе контакта с керамической формой. Сжимающие напряжения высокие на внутренней поверхности формы рис. 3, как же с временем уменьшают свои значения.

В случае свободной внешней поверхности задача становится симметрична относительно φ и θ , по этой причине напряжения σ_φ и σ_θ на рис. 3 равны.

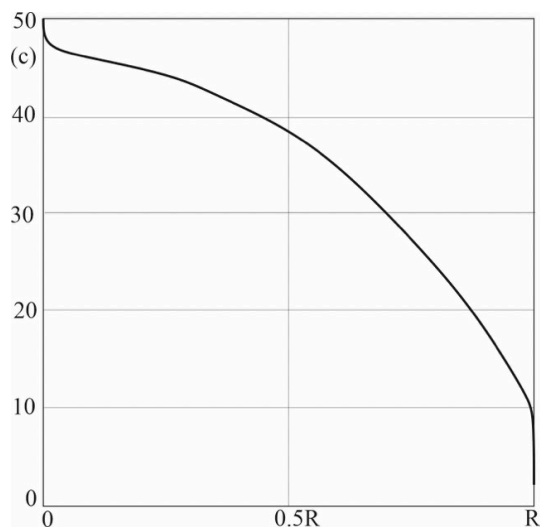


Рис. 2 Движение границы разделяющей твердую и жидкую фазы

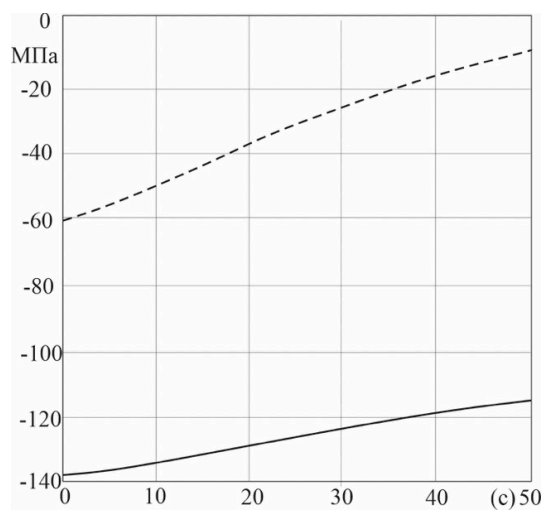


Рис. 3 Распределение сжимающих напряжений на поверхности контакта металл - ОФ. Прямой обозначено радиальное напряжение, пунктирной σ_φ и σ_θ .

На рис. 4 приведены напряжения на внешней поверхности керамической оболочки для разных случаев погружения в опорный наполнитель, угол β принимался равным $\pi/4$, $\pi/2$ и $3\pi/4$. Опорный наполнитель создает сжимающие напряжения на внешней поверхности формы, при этом контактные напряжения на внутренней поверхности не возрастают.

Для более детального изучения вопроса рассмотрим температуру прокаливания керамической формы. На рис. 5 продемонстрирована зависимость максимального напряжения в керамической форме от температуры прокаливания в первый временной интервал. Чем выше температура прокаливания, тем меньше максимальные напряжения зарождаются в керамической форме при кристаллизации отливки.

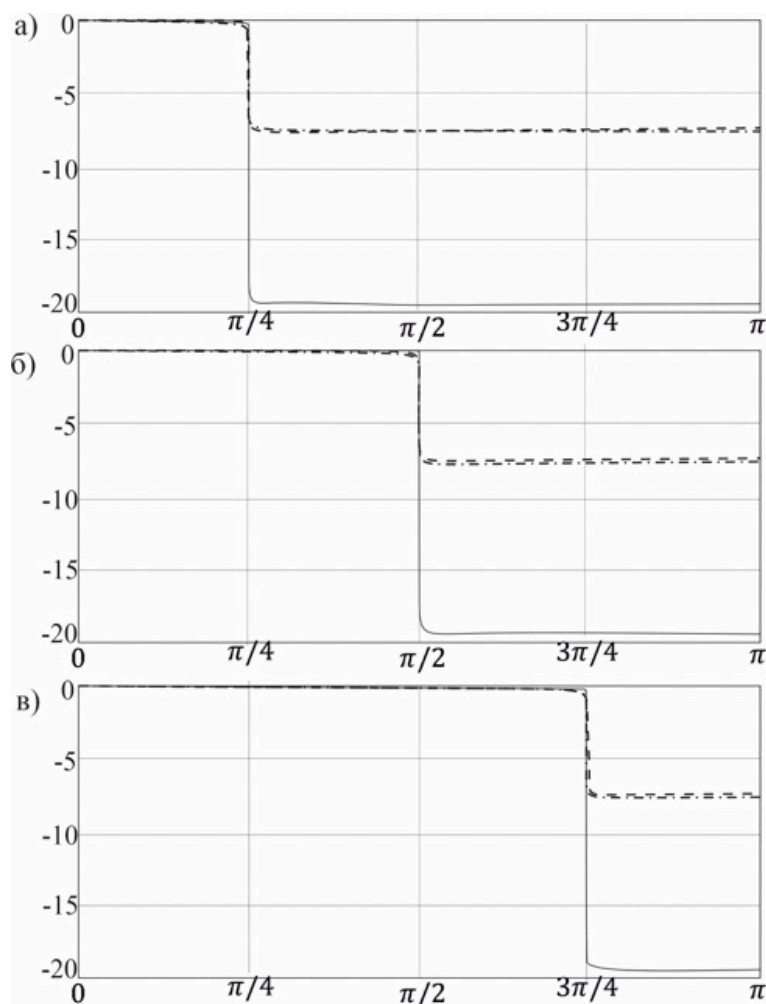


Рис. 4. Распределение напряжений на внешней поверхности формы погруженной на угол β : а) $\pi/4$; б) $\pi/2$, в) $3\pi/4$

Заключение. В первые секунды заливки металла в сферическую керамическую форму опорный наполнитель оказывает негативное влияние на образование отрицательных напряжений на внешней поверхности оболочки. Степень погружения в опорный наполнитель не увеличивает напряжения на свободной

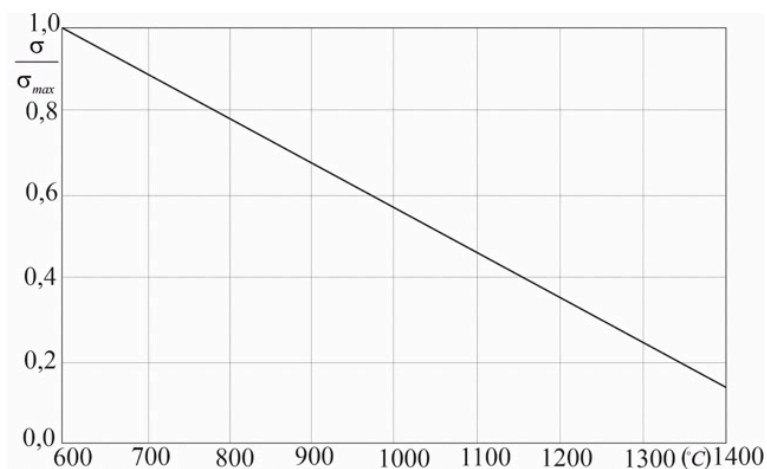


Рис. 5. Зависимость максимального напряжения в керамической форме от температуры прокаливания

внешней поверхности формы. С момента начала заливки до кристаллизации стальной заготовки в материале формы образуются сжимающие напряжения, значения которых со временем понижаются.

Максимальное напряженное состояние керамическая форма испытывает в первые доли секунд заливки, при этом самые высокие сжимающие напряжения образуются на внутренней поверхности формы. На их значения опорный наполнитель практически не оказывает влияния, чего нельзя сказать о температуре предварительного подогрева оболочки. Чем выше температура прокалики, тем меньше напряжения и вероятность растрескивания формы.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. А. В. Ткачева написание текста рукописи, построение математической модели и получение решения, согласование финальной версии рукописи, А. А. Евстигнеева обзор литературы по теме статьи, постановка задачи, редактирование текста рукописи.

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

Источник финансирования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №24-29-00214, <https://rscf.ru/project/24-29-00214/>

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. A. V. Tkacheva writing the text of the manuscript, constructing a mathematical model and obtaining a solution, agreeing on the final version of the manuscript, A. A. Evstigneeva reviewing the literature on the topic of the article, setting the problem, editing the text of the manuscript.

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

Funding. The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation №24-29-00214, <https://rscf.ru/project/24-29-00214/>

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Singh R. Mathematical modeling for surface hardness in investment casting applications . // Journal of mechanical science and technology. 2012. № 26. С. 3625–3629.
- [2] Liu C. Influence of complex structure on the shrinkage of part in investment casting process // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2015. № 77. С. 1191–1203.
- [3] Khan M. A. A., Sheikh A. K. Simulation tools in enhancing metal casting productivity and quality: A review. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B // Journal of Engineering Manufacture. 2016. № 230(10). С. 1799–1817.
- [4] Dong Y.W., Li X.L., Zhao Qi и др. Modeling of shrinkage during investment casting of thin walled hol-low turbine blades // Journal of Materials Processing Technology. 2017. № 244. С. 190 – 203.
- [5] Bansode S. N., Phalle V. M., Mantha S. S. Optimization of process parameters to im-prove dimensional accuracy of investment casting using Taguchi approach // Advances in Mechanical Engineering. 2019. № 11(4). С. 1 – 12.
- [6] Bansode S. N., Phalle V. M., Mantha S. Taguchi approach for optimization of parameters that reduce dimensional variation in investment casting // Archives of Foundry Engineering. 2019. № 19(1). С. 5 – 12.
- [7] Rakoczy L., Cygan R. Analysis of temperature distribution in shell mould during thin-wall superalloy casting and its effect on the resultant microstructure // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2018. № 18. С. 1441 – 1450.
- [8] Banerjee S., Sutradhar G. Analysis of Casting Defects in Investment Casting by Simula-tion .Advances in Materials // Mechanical and Industrial Engineering: Selected Contribu-tions from the First International Conference on Mechanical Engineering. Kolkata India : Jadavpur University Springer International Publishing, 2019. С. 247 – 271.
- [9] Kanyo Janos E., Schafföner Stefan, Uwanyuze R. Sharon, Leary Kaitlynn S. An overview of ceramic molds for investment casting of nickel super-alloys // Journal of the European Ceramic Society. 2020. № 40(15). С. 4955–4973.
- [10] Liu G. The effects of microstructure and microtexture generated during solidifica-tion on deformation micromechanism in IN713C nickelbased superalloy // Acta Materialia. 2018. № 148. С. 391 – 406.
- [11] Wang Guoxiang. Investment Casting Process Design of Large-Size Superalloy Castings // Precision Forming Technology of Large Superalloy Castings for Aircraft Engines. Springer Singapore, 2021. P. 33–65. ISBN: 9789813362208. URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-981-33-6220-8_2.
- [12] Pattnaik S., Karunakar D. B., Jha P. K. Developments in investment casting process—a review // Journal of Materials Processing Technology. 2012. № 212(11). С. 2332–2348.
- [13] Евстигнеев А. И., Дмитриев Э.А., Чернышева Д.В., Одинокоев В.И. Моделирование внеш-него силового воздействия на стойкость оболочковой формы при заливке в нее стали // Математическое моделирование. 2022. № 34(5). С. 61–72.

REFERENCES

- [1] Singh R. Mathematical modeling for surface hardness in investment casting applications . // Journal of mechanical science and technology. 2012. № 26. С. 3625–3629.
- [2] Liu C. Influence of complex structure on the shrinkage of part in investment casting process // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2015. № 77. С. 1191–1203.
- [3] Khan M. A. A., Sheikh A. K. Simulation tools in enhancing metal casting productivity and quality: A review. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B // Journal of Engineering Manufacture. 2016. № 230(10). С. 1799–1817.

-
- [4] Dong Y.W., Li X.L., Zhao Qi и др. Modeling of shrinkage during investment casting of thin walled hol-low turbine blades // *Journal of Materials Processing Technology*. 2017. № 244. C. 190 – 203.
- [5] Bansode S. N., Phalle V. M., Mantha S. S. Optimization of process parameters to improve dimensional accuracy of investment casting using Taguchi approach // *Advances in Mechanical Engineering*. 2019. № 11(4). C. 1 – 12.
- [6] Bansode S. N., Phalle V. M., Mantha S. Taguchi approach for optimization of parameters that reduce dimensional variation in investment casting // *Archives of Foundry Engineering*. 2019. № 19(1). C. 5 – 12.
- [7] Rakoczy L., Cygan R. Analysis of temperature distribution in shell mould during thin-wall superalloy casting and its effect on the resultant microstructure // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2018. № 18. C. 1441 – 1450.
- [8] Banerjee S., Sutradhar G. Analysis of Casting Defects in Investment Casting by Simulation. *Advances in Materials // Mechanical and Industrial Engineering: Selected Contributions from the First International Conference on Mechanical Engineering*. Kolkata India : Jadavpur University Springer International Publishing, 2019. C. 247 – 271.
- [9] Kanyo Janos E., Schafföner Stefan, Uwanyuze R. Sharon, Leary Kaitlynn S. An overview of ceramic molds for investment casting of nickel super-alloys // *Journal of the European Ceramic Society*. 2020. № 40(15). C. 4955–4973.
- [10] Liu G. The effects of microstructure and microtexture generated during solidification on deformation micromechanism in IN713C nickelbased superalloy // *Acta Materialia*. 2018. № 148. C. 391 – 406.
- [11] Wang Guoxiang. Investment Casting Process Design of Large-Size Superalloy Castings // *Precision Forming Technology of Large Superalloy Castings for Aircraft Engines*. Springer Singapore, 2021. P. 33–65. ISBN: 9789813362208. URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-981-33-6220-8_2.
- [12] Pattnaik S., Karunakar D. B., Jha P. K. Developments in investment casting process—a review // *Journal of Materials Processing Technology*. 2012. № 212(11). C. 2332–2348.
- [13] Evstigneev A.I., Dmitriev E.A., Chernysheva D.V., Odinkov V.I. Modeling of external force influence on the resistance of a shell mold when steel is poured into it // *Math modeling*. 2022. no. 34(5). P. 61–72.