

УДК 621.74.045

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ И СТРУКТУР ОБОЛОЧКОВЫХ ФОРМ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ

Одинокое В.И.¹, д.т.н., профессор-консультант, главный научный сотрудник Управления
научно-исследовательской деятельностью (79122718858@yandex.ru)

Дмитриев Э.А.¹, д.т.н., доцент, ректор (rector@knastu.ru)

Евстигнеев А.И.^{1,2}, д.т.н., профессор-консультант, главный научный сотрудник Управления
научно-исследовательской деятельностью (diss@knastu.ru)

Свиридов А.В.¹, к.т.н., доцент кафедры «Металлургия
машиностроения» (andrey1979_2009@mail.ru)

Иванкова Е.П.¹, старший преподаватель кафедры «Промышленная
электроника» (jenyvany@mail.ru)

¹ Комсомольский-на-Амуре государственный университет (КнАГУ)
(681013, Россия, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27)

² Хабаровский федеральный исследовательский центр (Институт машиноведения и металлургии) ДВО РАН
(681005, Россия, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, 1)

Аннотация. Представлена математическая модель процесса оптимизации выбора материала и морфологического строения оболочковой формы, обладающей наибольшей сопротивляемостью к трещинообразованию при заливке ее жидким металлом. Для решения поставленной задачи использована теория малых упругопластических деформаций и уравнения теплопроводности, а также апробированные численные методы. Построена целевая функция $\min - \max$ от управляющих переменных, характеризующих свойства формовочного материала, из которого изготавливается оболочковая форма. Рассмотрен процесс нагрева осесимметричной оболочковой формы при заливке в нее жидкого металла. Стойкость оболочковой формы оценивается по возникающим в ней напряжениям. Составлен алгоритм решения задачи. С использованием численных схем и комплексов программ, разработанных в предыдущих исследованиях, построен алгоритм решения задачи оптимизации и найдены значения управляющих переменных. При этих значениях управляющих переменных оболочковая форма не разрушается даже при наличии жесткого процесса – заливки стали в холодную оболочковую форму. Проведен анализ влияния веса каждого из найденных параметров на значение построенной целевой функции. С помощью математического эксперимента проведено исследование морфологического строения оболочковой формы. Рассмотрена оболочковая форма из пяти слоев. Скорректированная система уравнений позволяет учитывать свойства слоев, выполненных из разных материалов. Выполнены расчеты для случая, когда слой оболочковой формы из материала, найденного оптимизацией, занимает различные положения в сечении формы; при этом остальные слои формы изготовлены из традиционной керамики. Найдено оптимальное местоположение этого слоя. Показано, что наличие нескольких слоев с найденными свойствами не влияет на повышение трещиностойкости оболочковой формы.

Ключевые слова: оболочковая форма, свойства материалов, напряжение, деформации, перемещение, температура.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-9-742-754

ВВЕДЕНИЕ

Анализ тенденций развития технологических процессов формообразования оболочковых форм (ОФ) показывает, что точность и чистота поверхности фасонных отливок являются одними из главных критериев уровня развития науки и технологии литейного производства. Высокие показатели по этим признакам обеспечивают неразъемные высокоогнеупорные негасотворные ОФ по выплавляемым моделям (ВМ), материалы которых не взаимодействуют с заливаемыми сплавами. Одним из новых направлений повышения качества технологических и эксплуатационных свойств ОФ по ВМ является структурно-деформационный подход к управлению

морфологическим строением и свойствами ОФ на основе иерархии их структур как отдельных элементов, отдельного слоя или группы слоев, а также оболочки в целом.

Трещиностойкость ОФ по ВМ зависит, главным образом, от их напряженно-деформированного состояния (НДС) на различных этапах формообразования. Известные методы снижения НДС ОФ до сих пор остаются недостаточно изученными, так как нет четких сведений о параметрах различных структур ОФ и эффективности их влияния на изменение свойств.

Выбор путей повышения трещиностойкости как многослойных, так и монослойных (электрофоретических) ОФ за счет снижения НДС возможен на базе ком-

плексного изучения свойств материалов, формирующих ОФ: то есть необходимо выделить физические параметры материала, наиболее сильно влияющие на трещиностойкость ОФ при ее заливке жидким металлом. С этой целью необходимо построить математическую модель процесса заливки жидкого металла в ОФ.

Исследованию напряженно-деформированного состояния оболочковых форм по выплавляемым моделям, а также системы отливка – форма посвящено большое количество экспериментальных и теоретических работ [1 – 4]. Часть исследований проведена на основе чисто аналитических методов расчета НДС ОФ; в работах Н.И. Аласкарова и В.В. Петрова использовано численное моделирование НДС ОФ [5, 6].

Последующие работы М.В. Салиной [7], Э.А. Дмитриева [8], Г.М. Севастьянова [9], И.Г. Сапченко [10] расширяют границы применимости численного моделирования на различные технологические варианты формообразования и эксплуатации ОФ и их структурно-морфологическое строение.

Промежуточные обобщающие итоги состояния вопроса по исследованию НДС ОФ были подведены в монографиях [2, 3].

Из наиболее известных отечественных исследователей вопросами напряженного состояния литейных оболочковых форм занимались профессора В.В. Васин, В.А. Рыбкин, Б.А. Кулаков, А.С. Савинов, Г.И. Тимофеев [4, 11 – 15] и др. Зарубежных публикаций по НДС литейных оболочковых форм не обнаружено, хотя проведено множество теоретических и экспериментальных исследований НДС оболочечных конструкций с различными структурами и из различных функциональных материалов [16 – 35]. Однако математическому описанию этого сложного процесса посвящено мало работ.

Необходимо отметить, что объектами исследования НДС ОФ являются как многослойные [36], так и монослойные (электрофоретические) ОФ. Основы методологии математического численного моделирования НДС ОФ, основных технологических операций их формообразования и эксплуатации в литье по выплавляемым моделям (ЛВМ) сформулированы в монографиях [2, 3].

Первые публикации по численному моделированию НДС ОФ связаны с решением плоских задач [36], а все последующие – осесимметричных [37], причем при равных по толщине и одинаковых по физико-механическим свойствам слоях оболочек. В работе [37], посвященной НДС ОФ при заливке и охлаждении получаемой отливки в форме, принималось, что оболочковая форма полностью залита жидким металлом. Это является довольно грубым приближением.

Растрескивание оболочки может произойти и на практике происходит непосредственно в процессе заливки металла из-за термического удара. В работе [38] рассматривается сам процесс заливки формы жидким металлом, то есть с учетом «термоудара».

В настоящее время прорабатываются и развиваются вопросы НДС по новым модифицированным структурам ОФ и их особенностям. Именно этому вопросу и посвящена настоящая работа.

МОНОСЛОЙНАЯ ОБОЛОЧКОВАЯ ФОРМА

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Построение целевой функции оптимизации свойств материала ОФ связано с решением задачи по определению НДС при заливке в нее расплавленного металла.

Рассматривается осесимметричное тело вращения (рис. 1, а). Деформируемый материал, форма, затвердевший металл считаются изотропными. В этом случае имеем трехкомпонентную систему (рис. 1, б): область I – жидкий металл (деформируемая среда); область II – затвердевший металл; область III – форма. Используя теорию малых упругопластических деформаций, эйлерову систему координат и уравнение теплопроводности, можно записать для каждой из областей систему уравнений:

– область I:

$$\begin{aligned}\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma_{33} = \sigma = P_1; \\ P_1 = \gamma h; \dot{\theta} = a_p^* \Delta \theta;\end{aligned}\quad (1)$$

– области II, III:

$$\begin{aligned}\sigma_{ij,j} = 0; \\ \sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij} = 2G_p \varepsilon_{ij}^*; \varepsilon_{ij}^* = \varepsilon_{ij} - \frac{1}{3} \varepsilon \delta_{ij}; \varepsilon = \varepsilon_{ii}; \\ \varepsilon_{ii} = 3k_p \sigma + 3\alpha_p (\theta_n - \theta_p^*); \varepsilon_{ij} = 0, 5(U_{i,j} + U_{j,i}); \\ \dot{\theta} = a_p^* \Delta \theta,\end{aligned}\quad (2)$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; U_i – перемещения; ε_{ij} – компоненты тензора упругих деформаций; σ – гидростатическое напряжение; G_p ($p = II, III$) – модуль сдвига металла ($p = II$) и формы ($p = III$); δ_{ij} – символ Кронекера; k_p – коэффициент объемного сжатия; α_p – коэффициент линейного расширения; a_p^* – коэффициент температуропроводности ($p = I, II, III$); γ – плотность; h – текущая высота ОФ; θ_n – текущая температура; $\dot{\theta} = \frac{\partial \theta}{\partial \tau}$; τ – время; θ_p^* – начальная температура в области ($p = I, II, III$).

В системе (2) используется суммирование по повторяющимся индексам.

В процессе охлаждения жидкого металла при условии, что $\theta_m < \theta_k$ (где θ_m – температура металла; θ_k – температура кристаллизации), определяется толщина затвердевшего слоя из решения уравнения межфазового перехода

$$\frac{d\theta_1}{dn_*} \lambda_1 - \frac{d\theta_2}{dn_*} \lambda_2 = \frac{d\Delta}{d\tau} L\rho, \quad (3)$$

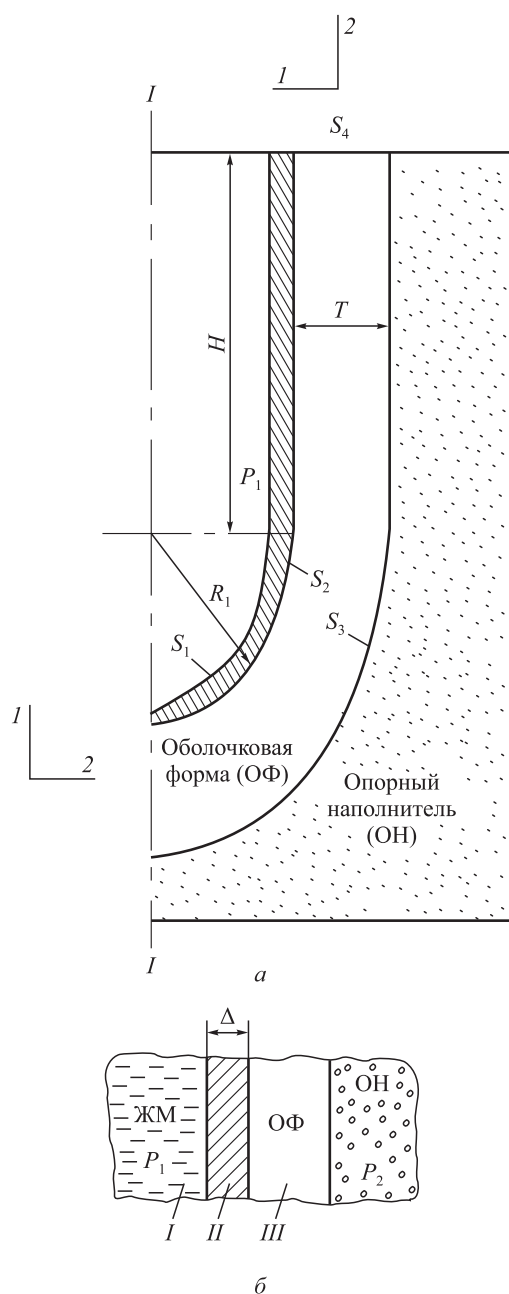


Рис. 1. Расчетная схема оболочковой формы (ОФ), заформованной в опорный наполнитель (ОН) и залитая жидким металлом (ЖМ) (ЖМ – жидкий металл (область I); затвердевшая корочка отливки (область II); ОФ – оболочковая форма (область III); ОН – опорный наполнитель):

a – сечение в вертикальной плоскости; *б* – схема моделирования областей системы

Fig. 1. Design scheme of the shell mold (SM), molded into the carrying filler (CF) and filled with liquid metal (LM): LM (zone I); hardened casting crust (zone II); SM (zone III);

a – section in the vertical plane; δ – modeling scheme of the system zones

где θ_1 и θ_2 – температура твердой и жидкой фазы; λ_1 и λ_2 – коэффициент теплопроводности твердой и жидкой фазы; Δ – толщина корочки; L – скрытая теплота плавления; ρ – плотность; n_* – нормаль к границе двух фаз.

Время процесса кристаллизации τ^* разбивается на малые шаги $\Delta\tau_n$ (где n – номер временного шага). На каждом временном шаге $\Delta\tau_n$ вычисляется прирост толщины твердой фазы Δ_n

$$\Delta = \sum_1^n \Delta_n.$$

При этом предполагается, что температура в твердой фазе по толщине Δ_n изменяется по линейному закону, градиент температуры в жидкой фазе равен нулю. С учетом этого решение уравнения (3) дает следующую зависимость для определения толщины закристаллизовавшейся корочки на временном шаге Δt_n :

$$\Delta_n = C\sqrt{\tau}; \quad C = \sqrt{\frac{2\Delta\theta_1\lambda_1}{\rho L}}, \quad (4)$$

где $\Delta\theta_1$ – перепад температур в твердой фазе вблизи фронта кристаллизации.

В системах (1) и (2) коэффициент температуропроводности α^* определяется зависимостью

$$a^* = \frac{\lambda}{C_\gamma}, \quad (5)$$

где λ – коэффициент теплопроводности; C – удельная теплоемкость.

Проведенные ранее исследования [38, 39] показали, что наибольшим напряжением в оболочке формы является σ_{22} . Поэтому оценивать трещиностойкость ОФ будем по возникающим в ней в процессе ее разогрева величине растягивающих и сжимающих напряжений σ_{22} . Напряженное состояние ОФ при заданном температурном воздействии (температуры заливаемого жидкого металла) характеризуется следующими физическими параметрами: G – модуль сдвига; k – коэффициент объемного сжатия; α – коэффициент линейного расширения; λ – коэффициент теплопроводности; C – коэффициент удельной теплоемкости; γ – плотность. Учтем, что $k = \frac{1-2\mu}{E}$ (где E – модуль Юнга; μ – коэффициент Пуассона (для керамики $\mu = 0,25$)).

Эти параметры являются управляющими переменными. Будем определять гипотетический материал ОФ, при котором величины напряжений σ_{22} в слоях формы будут наименьшими. Рассмотрим наиболее жесткий процесс: заливка стали в холодную ОФ.

С учетом осевой симметрии имеем $\sigma_{31} = \sigma_{32} = 0$;
 $\varepsilon_{13} = \varepsilon_{23} = 0$; $U_3 = 0$.

Начальные условия задачи:

$\Delta|_{\tau=0} = 0$ – отсутствие твердой фазы металла;
 $\theta_l|_{\tau=0} = \theta_0$ – температура разливаемого жидкого металла;
 $\theta_{III}^*|_{\tau=0} = \theta^*$ – начальная температура формы; θ_{II} – температура песка; θ_{II}^* – температура кристаллизации металла.

Граничные условия задачи (рис. 1, а):

– на оси симметрии $U_2 = 0$; $\sigma_{21} = 0$; $q_n = 0$;

– на поверхностях S_1, S_3

$$\sigma_{11}|_{S_1} = -P_1; \quad \sigma_{12}|_{S_1} = 0; \quad v_1|_{S_3} = 0; \quad \sigma_{21}|_{S_4} = 0; \quad \sigma_{22}|_{S_4} = 0;$$

$$\sigma_{12}|_{S_3} = -\Psi \frac{v_{\text{ск}}}{v^*} \cos(n_1 x_1); \quad q_n|_{S_3} = \alpha^* (\theta_n - \theta_n),$$

где $v_{\text{ск}}$ – скорость скольжения материала формы относительно песка; v^* – нормирующая скорость; Ψ – параметр, характеризующий условия трения между формой и песком; $q_n|_{S_3}$ – плотность теплового потока по нормали к поверхности S_3 ; α^* – коэффициент теплообмена между оболочковой формой и песком.

Итак, будем искать функцию

$$F = \min \sigma_{22}(G, \alpha, \lambda, C, \gamma) \max \sigma_{22}(\tau, Q) \quad (6)$$

из решения системы уравнений (1), (2) при начальных и граничных условиях (в уравнении (6) Q – область поля напряжения σ_{22}).

На управляющие переменные в целевой функции (6) введем ограничения:

$$\begin{aligned} 2000 &\leq G \leq 8000 \text{ кг/мм}^2; \\ 0,12 \cdot 10^{-6} &\leq \alpha \leq 12 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}; \\ 0,0003 &\leq \lambda \leq 0,0010 \text{ Вт/(мм} \cdot \text{°C)}; \\ 500 &\leq C \leq 1350 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)}; \\ 1,2 \cdot 10^{-6} &\leq \gamma \leq 4 \cdot 10^{-6} \text{ кг/мм}^3. \end{aligned} \quad (7)$$

Приняты следующие значения параметров разливаемой стали при $\theta \geq 1000$ °C:

$$\begin{aligned} G &= 1000 \text{ кг/мм}^2; \quad \alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}; \\ \lambda &= 0,0298 \text{ Вт/(мм} \cdot \text{°C)}; \\ L &= 270 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}; \quad C = 444 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)}; \\ \gamma &= 7,80 \cdot 10^{-6} \text{ кг/мм}^3; \\ \theta_k &= 1450 \text{ °C}; \quad \theta_m = 1500 \text{ °C}. \end{aligned} \quad (8)$$

При решении системы уравнений (1), (2) при начальных и граничных условиях использовали численные методы, описанные в работе [40] при исследовании различных физических процессов.

За начальное приближение – опорное решение – примем керамический материал формы со следующими физическими свойствами:

$$\begin{aligned} G &= 2960 \text{ кг/мм}^2; \quad \alpha = 0,51 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}; \\ \lambda &= 0,000812 \text{ Вт/(мм} \cdot \text{°C)}; \\ C &= 840 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)}; \quad \gamma = 2,0 \cdot 10^{-6} \text{ кг/мм}^3. \end{aligned} \quad (9)$$

В формализованном виде целевую функцию (6) можно переписать в виде:

$$F(t_i, i = 1, 5) \rightarrow \min \sigma_{22}(t_i) \max \sigma_{22}(\tau, Q), \quad (10)$$

где $t_i, i = 1, \dots, 5$ – управляющие переменные, входящие в функцию (6).

Пусть $t_i^0, i = 1, \dots, 5$ – опорное решение.

По результатам проведенных теоретических исследований [38, 39] наибольшие растягивающие напряжения σ_{22} имеют место в наружном слое оболочковой формы. По величине σ_{22} в этой области оболочковой формы будем вести оценку функции (10) при варьировании управляющих переменных $t_i, i = 1, \dots, 5$.

АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

1 – Исследуемая область разбивается на конечное число ортогональных элементов.

2 – Вычисляются длины дуг элементов в соответствии с методикой, описанной в работе [40].

3 – Время τ^* разбивается на конечное число шагов $\tau^* = \sum \Delta \tau_n$.

4 – Задаются начальные и граничные условия задачи по элементам, образующим рассматриваемую область.

5 – Задается опорное решение задачи $t_i^0, i = 1, \dots, 5$.

6 – Определяется поле температур на временном шаге $\Delta \tau_n$ численным решением уравнения теплопроводности по методике и алгоритму, описанному в работе [40] при наличии начальных и граничных условий на данном временном шаге.

7 – Если в области I (рис. 1, а) у поверхности S_2 выполняется условие $\theta|_{S_2} \leq \theta_k$, то вычисляется толщина закристаллизовавшейся корочки Δn по формуле (4).

8 – При найденном поле температур численно решается система уравнений (2) с учетом разностных аналогов и методики, описанной в работе [40].

9 – Определяется поле напряжений $\sigma_{ij}(i, j = 1, 2, 3)$ и перемещений $U_i(i = 1, 2)$. Отыскивается и запоминается максимальное значение напряжений $\sigma_{22}(\max \sigma_{22} = \sigma_{22}^*)$.

10 – Производится шаг по времени и выполняется операция б, если $(\sigma_{22}^*)_n > (\sigma_{22}^*)_{n-1}$, или операция 11, если $(\sigma_{22}^*)_n < (\sigma_{22}^*)_{n-1}$.

11 – Из множества управляющих переменных $A_i^5 = \{t_i^0\}$ выбирается t_k^0 и ему придается приращение $\pm t_k^0$. Следует многократный посыл к операции б вплоть до границ управляющей переменной t_k^0 .

12 – Выбирается решение с параметром t_k^0 , соответствующее наименьшему значению с параметром целевой функции (10). Стирается старое и запоминается новое опорное решение t_k^0 .

13 – Осуществляется переход к новому управляющему параметру t_{k+1} : при $k \leq 5$ следует операция б; при $k = 6$ следует операция 14.

14 – Осушается сравнение двух опорных решений (полученного t^p и t^{p-1}) $\left[\left\{ t_i^p \right\} - \left\{ t_i^{p-1} \right\} \right] \leq \varepsilon$ (где p – номер опорного решения).

Если неравенство выполняется, то процесс вычислений закончен, если нет – следует операция 5.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Геометрические параметры: $T = 5$ мм; $H = 50$ мм; $R_1 = 20$ мм.

Временные интервалы Δt_n : 0,01, 0,02, 0,03, 0,04, 0,05, 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5, 2, 5, 10, 8, 3, 3, 5, 10, 15, 20 с.

При численной реализации решения задачи по сформулированному алгоритму использовали программный комплекс «Одиссей» [41]. Перед расчетом был проведен мониторинг с учетом массива справочных данных физических свойств материала (9) при различном разбиении области на элементы: 91, 117, 130, 240, 260. Наибольшее растягивающее напряжение в осевом сечении σ_{22} на наружной поверхности ОФ составило соответственно (приближенно): 27, 24, 22, 21, 20,5 МПа, но в разные временные интервалы. Было принято разбиение на области по 117 элементов.

В результате оптимизации получены следующие значения параметров целевой функции (6):

$$\begin{aligned} \alpha &= 0,12 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}; G = 2000 \text{ кг/мм}^2; \\ \lambda &= 0,001 \text{ Вт/(мм} \cdot \text{°C)}; \\ C &= 1350 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)}; \gamma = 4,0 \cdot 10^{-6} \text{ кг/мм}^3. \end{aligned} \quad (11)$$

Отметим, что значения параметров (11) получены на разных временных интервалах охлаждения ОФ.

Разрушение ОФ опасно, когда еще не сформировался (закристаллизовался) наружный слой отливки. При наличии достаточно твердой корочки будущей отливки разрушение ОФ при дальнейшем ее охлаждении не влияет на качество получаемого литого изделия.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ МОНОСЛОЙНОЙ ОБОЛОЧКОВОЙ ФОРМЫ

Проведенные расчеты показывают, что за 26 – 29 с охлаждения толщина корочки составит 2 – 3 мм. Этого достаточно, чтобы не произошел прорыв металла при растрескивании ОФ.

При параметрах (11) вполне выдерживается этот временной интервал. Найденное решение составляет границу исследуемой целевой функции (6).

Чтобы перейти к реальному материалу, из которого могла бы быть изготовлена ОФ, выдерживающая температурные напряжения при заливке в нее стали, необходимо определить значимость (вес) каждого из параметров (11) в изменении функции (6). Вычислим

значение функции $F^x(t_i, i = 1, \dots, 5)$ при изменении каждого из найденных параметров $t_i, i = 1, \dots, 5$ от опорного решения (9). При этом

$$\begin{aligned} F^x(t_i^x, i = 1, \dots, 5) &= 24,8 \text{ МПа}; \tau = 18,65 \text{ с}; \\ t_1 &= \alpha = 0,12 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1} \Rightarrow \\ \Rightarrow F_1^x &= 8,1 \text{ МПа} (\tau = 18,65 \text{ с}); \\ t_2 &= G = 2000 \text{ кг/мм}^2 \Rightarrow \\ \Rightarrow F_2^x &= 16,44 \text{ МПа} (\tau = 18,65 \text{ с}); \\ t_3 &= \lambda = 0,001 \text{ Вт/(мм} \cdot \text{°C)} \Rightarrow \\ \Rightarrow F_3^x &= 24,2 \text{ МПа} (\tau = 18,65 \text{ с}); \\ t_4 &= C = 1350 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)} \Rightarrow \\ \Rightarrow F_4^x &= 23,28 \text{ МПа} (\tau = 32,65 \text{ с}); \\ t_5 &= \gamma = 4,0 \cdot 10^{-6} \text{ кг/мм}^3 \Rightarrow \\ \Rightarrow F_5^x &= 22,5 \text{ МПа} (\tau = 37,65 \text{ с}). \end{aligned} \quad (12)$$

Следует отметить, что величины λ, C и γ – это фактически один параметр $a^* = \frac{\lambda}{C\gamma}$, когда можно пренебречь зависимостью λ от температуры.

В процентном выражении «вес» найденных параметров (11) в соответствии со значениями (12): α (67,5 %); G (33 %); λ (2,4 %); C (6,1 %); γ (9,2 %).

Наибольшее влияние на изменения напряжения σ_{22} при охлаждении ОФ имеют параметры α и G . Остальные параметры, учитывая, что разброс экспериментальных данных по керамическому материалу колеблется в пределах 30 – 40 %, несущественно влияют на оптимизацию целевой функции (10).

На разрушение ОФ влияет предел прочности $\sigma_{пр}$ на растяжение. Отметим, что предел прочности на сжатие $\sigma_{нс}$ в несколько раз выше $\sigma_{пр}$. В зависимости от свойств керамики $\sigma_{пр} = 30 \div 100$ МПа. С прочностью керамики коррелируется модуль сдвига G : чем выше значение G , тем больше значение $\sigma_{пр}$.

Путем оптимизации удалось найти материал ОФ, при котором напряжение σ_{22} снизилось в 6,0 раз.

На рис. 2, а приведены эпюры σ_{22} в корочке ОФ через 18,65 с охлаждения при заливке стали в холодную форму. Физические свойства формы соответствуют найденным значениям (11). Видно, что растягивающие и сжимающие напряжения резко снизились по сравнению со значениями σ_{22} для формы с физическими параметрами (9) (рис. 2, б).

Отметим, что найденные физические параметры λ, C и γ в решении (11) по всей видимости не однозначны, так как характеризуются одним параметром температуропроводности a^* (5). В решении (11) $a^* = 0,185$ с, а это значение можно получить при различных комбинациях λ, C и γ . Но эти параметры не очень сильно влияют на изменение напряжения σ_{22} , поэтому не представляется сложности в их выборе для реального материала формы. Самым значимым параметром при выборе материала

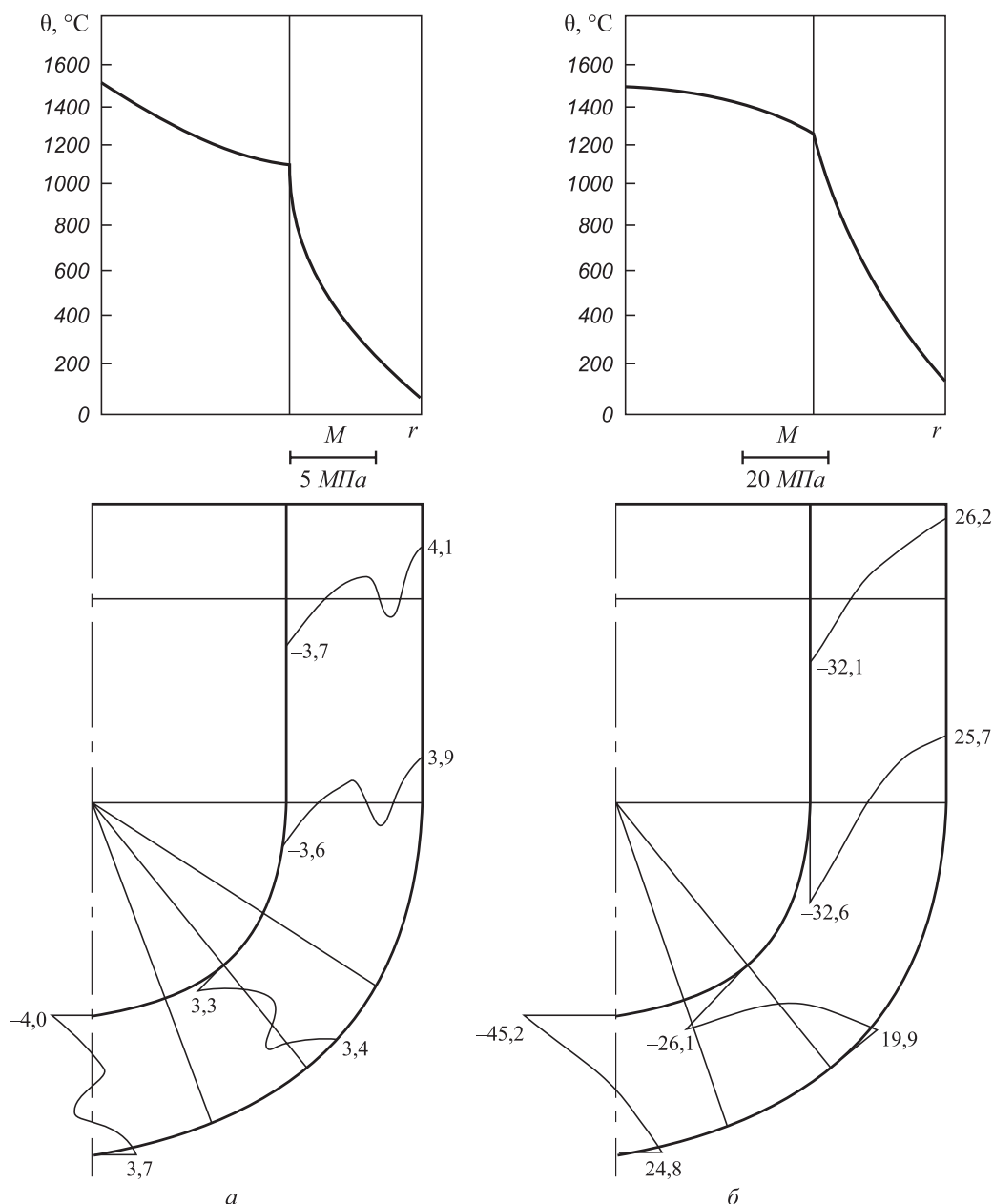


Рис. 2. Эпюры напряжений σ_{22} по толщине оболочковой формы в разных сечениях и в динамике ее охлаждения после заливки сталью в холодную форму при $\tau_{\text{охл}} = 18,65$ с:
 а – материал формы (вариант 2) (11); б – материал формы (вариант 1) (9)

Fig. 2. Plots of stresses σ_{22} over the thickness of SM in different sections and in dynamics of its cooling after pouring steel into a cold mold $\tau_{\text{охл}} = 18.65$ s:
 а – mold material (option 2) (11); б – mold material (option 1) (9)

ла формы является коэффициент линейного расширения $\alpha = 0,12 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, который примем за основной.

МНОГОСЛОЙНАЯ ОБОЛОЧКОВАЯ ФОРМА

Сначала была проведена оптимизация по выбору материала для изготовления монослойной (форетической) ОФ. Дальнейший путь оптимизации изготовления ОФ – управление ее морфологическим строением: рассматривается концепция многослойной формы с различными физико-механическими свойствами по слоям.

Рассмотрим пятислойную ОФ (рис. 3) (штриховкой показан внутренний слой ОФ со свойствами

$$G = 8000 \text{ кг/мм}^2; a^* = 0,2 \text{ мм}^2/\text{с}, \quad (13)$$

остальные слои со свойствами (9)). Исходная система уравнений будет аналогична системам (1), (2) с той лишь разницей, что уравнения (2) записываются в той же форме, но с физическими компонентами по каждому слою. Решение сформулированной системы уравнений осуществляется с теми же начальными и граничными

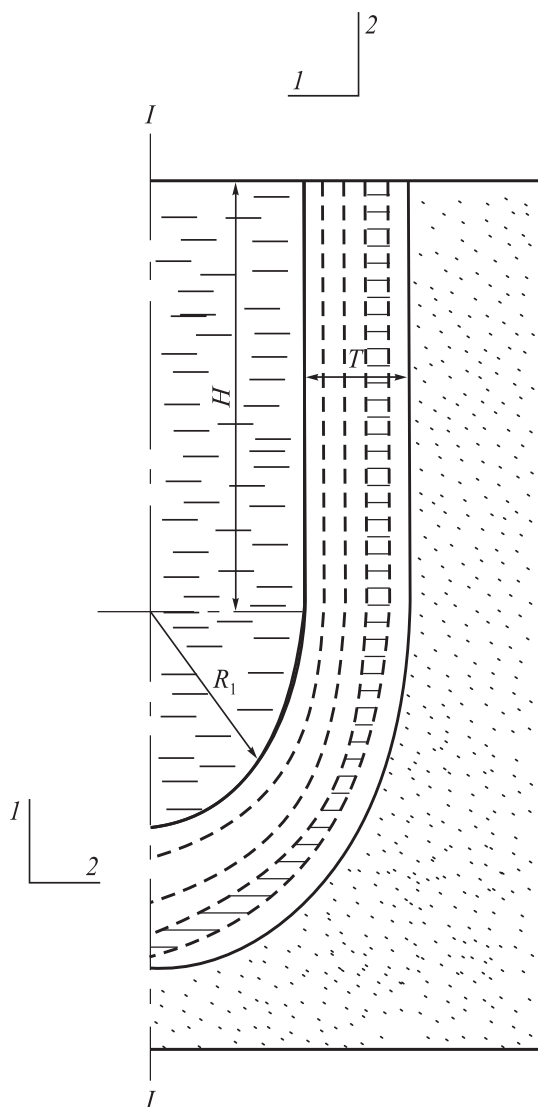


Рис. 3. Схема пятислойной оболочковой формы в меридиальном сечении с учетом осевой симметрии

Fig. 3. Diagram of a five-layer SM in the meridian section taking into account the axial symmetry

условиями, что и ранее, с использованием численных методов, описанных в работе [40].

В настоящей работе проведены расчеты разливки металлов в ОФ, в которой характеристики физических свойств некоторых слоев соответствуют найденным ранее (в первой части настоящей работы).

Результаты теоретических расчетов приведены на рис. 4 – 6.

При найденном значении $\alpha = 0,12 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ было принято: $G = 8000 \text{ кг/мм}^2$; $a^* = 0,2 \text{ мм}^2/\text{с}$. То есть взяты более жесткие параметры по модулю сдвига (верхняя граница). Если ОФ с такими параметрами слоя выдержит, то при использовании слоя с меньшим значением G – тем более.

По результатам теоретических расчетов получено, что параметрами $G = 8000 \text{ кг/мм}^2$, $a^* = 0,2 \text{ мм}^2/\text{с}$ должен обладать слой, примыкающий к наружному слою ОФ.

На рис. 4 приведены эпюры σ_{22} при разливке алюминия в холодную форму (сплошными линиями показаны эпюры σ_{22} при разливке алюминия в monosлойную форму со свойствами (9), пунктирными – эпюры σ_{22} при разливке в форму со слоем (рис. 3) со свойствами $G = 8000 \text{ кг/мм}^2$; $a^* = 0,2 \text{ мм}^2/\text{с}$).

Свойства алюминия: $\theta_m = 700 \text{ }^\circ\text{C}$; $\alpha = 26,5 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$; $\lambda = 0,23 \text{ Вт/(мм} \cdot \text{}^\circ\text{C)}$; $L = 397 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$; $G = 4000 \text{ кг/мм}^2$; $\gamma = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ кг/мм}^3$.

Видно, что при разливке алюминия в традиционную форму может произойти ее разрушение по сжимающим напряжениям $\sigma_{22} = 31 \text{ МПа}$ уже через 0,45 с.

Форма со слоем (рис. 3), характеризуемым данными $G = 8000 \text{ кг/мм}^2$; $a^* = 0,2 \text{ мм}^2/\text{с}$ – выдерживает нагрузку без разрушения.

На рис. 5 представлены результаты разливки стали в горячую форму ($\theta_\phi = 700 \text{ }^\circ\text{C}$). Наибольшие растягивающие напряжения σ_{22} при использовании традиционной формы составляют 21,8 МПа при $\tau = 24 \text{ с}$, а в форме (рис. 3) – $\sigma_{22} = 5,3 \text{ МПа}$ в срединном сечении цилиндрической части. Видим, что разрушений в обоих случаях нет, но со слоем (рис. 3) форма работает значительно надежнее.

На рис. 6 представлены значения σ_{22} при разливке стали в холодную форму. Традиционная форма разрушается (сплошные линии), а со слоем со свойствами $G = 8000 \text{ кг/мм}^2$, $a^* = 0,2 \text{ мм}^2/\text{с}$ – выдерживает нагрузку без разрушения. Наибольшие значения напряжений σ_{22} в традиционной форме на оси симметрии при $\tau = 1,65 \text{ с}$ составляют 54 МПа. Напряжения σ_{22} в цилиндрической части при $\tau = 18,65 \text{ с}$ составляют 25 МПа, а при наличии слоя со свойствами $G = 8000 \text{ кг/мм}^2$, $a^* = 0,2 \text{ мм}^2/\text{с}$ – форма выдерживает нагрузку без разрушения. Напряжения σ_{22} на оси симметрии при $\tau = 1,65 \text{ с}$ составляют 14,3 МПа, в срединном сечении цилиндрической части при $\tau = 1,65 \text{ с}$ $\sigma_{22} = 6,7 \text{ МПа}$ (здесь приведены максимальные значения σ_{22} по абсолютной величине).

Прослеживаются определенные закономерности. При разливке алюминия в традиционную форму (рис. 4) сжимающие напряжения σ_{22} достигают наибольшей величины с внутренней поверхности ОФ, а растягивающие напряжения – с наружной. Сжимающие напряжения достигают наибольшей величины уже при $\tau = 0,45 \text{ с}$, а растягивающие напряжения σ_{22} увеличиваются до $\tau = 26,2 \text{ с}$.

По внутренней образующей ОФ сжимающие напряжения имеют наибольшие значения в осевом сечении, уменьшаются в цилиндрической части ОФ. Растягивающие напряжения σ_{22} на наружной поверхности ОФ имеют примерно одну и ту же величину, изменяются только во времени (рис. 4).

Сжимающие напряжения σ_{22} формы со слоем (рис. 3) имеют тот же характер, что и сжимающие напряжения в традиционной форме, но в три – четыре раза меньше по абсолютной величине, а растягивающие напряжения σ_{22} достигают своего максимального значения внутри

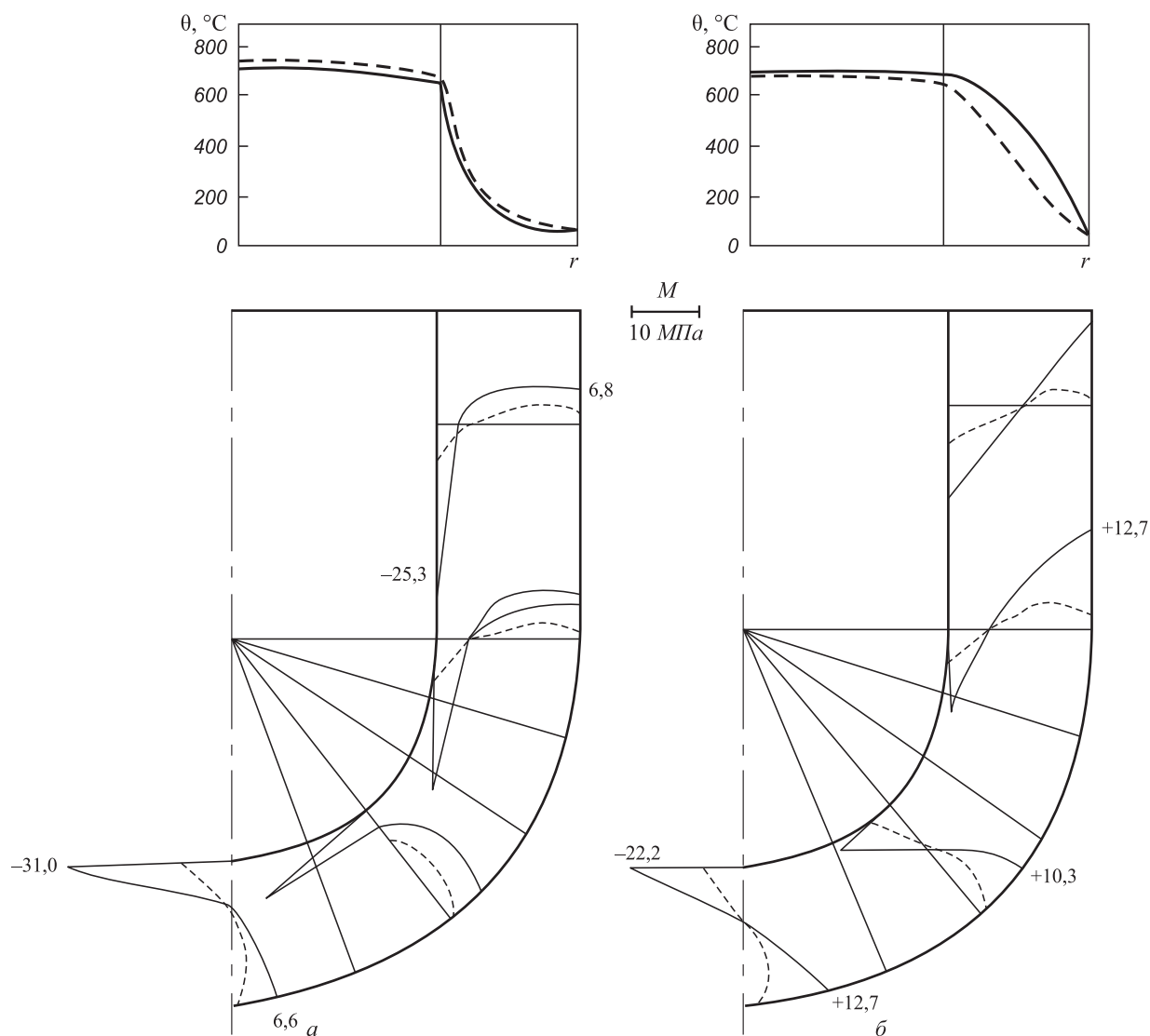


Рис. 4. Эпюры напряжений σ_{22} по толщине оболочковой формы при заливке алюминия в холодную форму:
 — традиционная форма; --- предложенная форма со свойствами материала (13); а — $\tau_{\text{охл}} = 0,45$ с; б — $\tau_{\text{охл}} = 26,2$ с

Fig. 4. Plots of stresses σ_{22} over the thickness of the SM when pouring Al into a cold form:

— traditional mold; --- the proposed mold with material properties according (13); а — $\tau_{\text{охл}} = 0.45$ s; б — $\tau_{\text{охл}} = 26.2$ s

сечения, ближе к середине, они примерно одинаковы по образующей и увеличиваются во времени.

При разливке стали в горячую (рис. 5) и холодную (рис. 6) формы качественная тенденция распределения напряжений σ_{22} примерно сохраняется, но значения сильно меняются. Сжимающие напряжения по внутренней образующей для всех форм увеличиваются во времени, достигая максимума при $\tau = 34$ с (разливка стали в горячую форму (рис. 5)) и при $\tau = 18,6$ с (разливка стали в холодную форму (рис. 6)). Растягивающие напряжения σ_{22} также увеличиваются во времени по внешней образующей при использовании традиционной формы и в середине сечения при использовании формы со слоем.

Таким образом, проведенные теоретические исследования показывают, что многослойная ОФ, изготовленная из керамического материала, обладающего

физическими свойствами (согласно условиям (9)), со слоем вблизи наружной поверхности с физическими свойствами (согласно условиям $G = 8000$ кг/мм², $a^* = 0,2$ мм²/с) при $\alpha = 0,12 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ вполне пригодна для разливки любого металла.

Выводы

Предпринята первая попытка путем математического моделирования спрогнозировать возможность управления структурно-морфологическим строением оболочковой формы, дать обоснование основных свойств исходных материалов, влияющих на стойкость оболочковой формы. Поставлена и решена актуальная математическая задача по оптимизации выбора свойств исходных материалов для изготовления многослойных оболочковых форм и их макроструктуры.

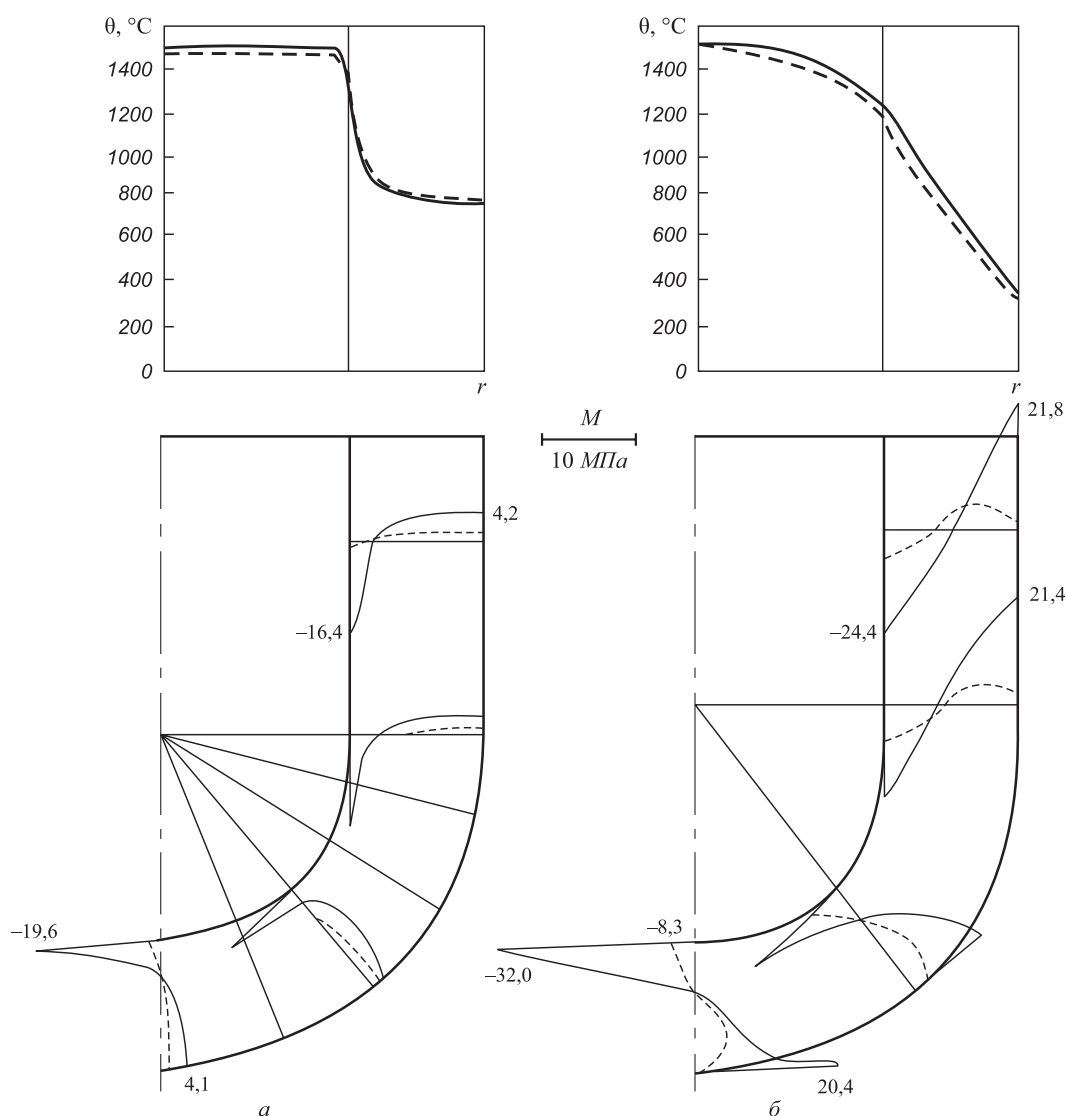


Рис. 5. Эпюры напряжений σ_{22} по толщине оболочковой формы при заливке стали в горячую форму: — традиционная форма; --- предложенная форма со свойствами материала (13); а — $\tau_{\text{охл}} = 0,25$ с; б — $\tau_{\text{охл}} = 34$ с

Fig. 5. Plots of stresses σ_{22} over the thickness of the SM when pouring steel into a hot mold: — traditional mold; --- the proposed mold with material properties according to (13); а — $\tau_{\text{охл}} = 0.25$ s; б — $\tau_{\text{охл}} = 34$ s

Главным параметром, определяющим стойкость оболочковой формы к разрушению при заливке жидким металлом, является коэффициент линейного расширения материала. Параметр теплопроводности не оказывает решающего влияния на НДС оболочковой формы и легко может быть подобран путем варьирования составляющих: коэффициента удельной теплоемкости, коэффициента теплопроводности, плотности.

В гипотетическом материале принято значение модуля сдвига 8000 кг/мм^2 , при котором получены хорошие результаты по НДС; при выборе реального материала модуль сдвига много меньше, а значит, уменьшаются напряжения, влияющие на стойкость ОФ к разрушению.

Установлено, что все слои многослойной ОФ могут быть изготовлены из традиционного керамического материала, кроме одного слоя, примыкающего к наружному слою ОФ.

Проведенные теоретические исследования являются основой для последующих работ по расчету НДС ОФ из известных на сегодня и возможно новых открываемых материалов для изготовления многослойных оболочек.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Литье по выплавляемым моделям / В.Н. Иванов, С.А. Казеннов, Б.С. Курчман и др.; под ред. Я.И. Шкленника и В.А. Озерова. — М.: Машиностроение, 1984. — 408 с.
2. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния оболочковых форм по выплавляемым моделям: монография / А.И. Евстигнеев, В.И. Одинокоев, В.В. Петров, Э.А. Дмитриев. — Владивосток: Дальнаука, 2009. — 140 с.
3. Напряженно-деформированное состояние оболочковых форм в литье по выплавляемым моделям / И.Г. Сапченко, С.А. Некрасов, С.Г. Жилин, М.В. Штерн. — Комсомольск-на-Амуре: ИМиМ ДВО РАН, 2005. — 156 с.

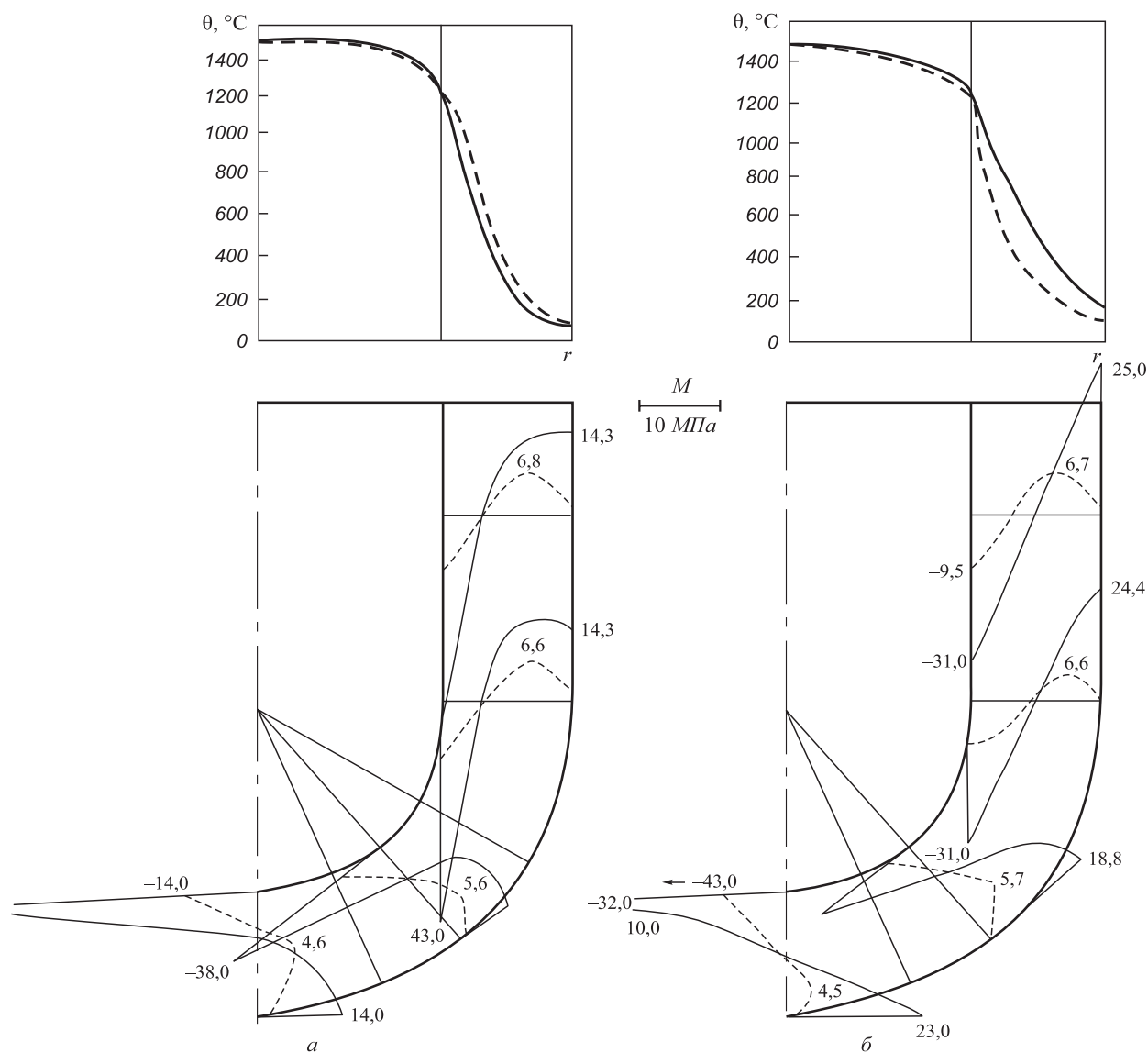


Рис. 6. Эпюры напряжений σ_{22} по толщине оболочковой формы при заливке стали в холодную форму:

— традиционная форма; --- предложенная форма со слоем из материала со свойствами (13); а — $\tau_{\text{охл}} = 1,65$ с; б — $\tau_{\text{охл}} = 18,65$ с

Fig. 6. Plots of stresses σ_{22} over the thickness of the SM when pouring steel into a cold mold:

— traditional mold; --- the proposed mold with a layer of material with properties (13); а — $\tau_{\text{охл}} = 1.65$ s; б — $\tau_{\text{охл}} = 18.65$ s

- Савинов А.С. Методические основы оценки и прогнозирования напряженно-деформированного состояния системы «отливка-форма» для предупреждения образования горячих трещин в фасонных отливках / Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Магнитогорск, 2016. — 42 с.
- Аласкаров Нофал Иса оглы. Исследование структуры и свойств оболочковых форм по выплавляемым моделям при их прокаливании, заливке расплавом и кристаллизации отливок // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Комсомольск-на-Амуре, 1997. — 18 с.
- Петров В.В. Теоретические и технологические основы управления свойствами моделей и форм в литье по удаляемым моделям для получения качественных отливок // Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Комсомольск-на-Амуре, 2002. — 44 с.
- Салина М.В. Комплексное исследование влияния вакуумирования на размерно-геометрическую точность и физико-механические свойства моделей и оболочковых форм с целью получения качественных точных отливок в литье по выплавляемым моделям // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Комсомольск-на-Амуре, 2005. — 24 с.
- Дмитриев Э.А. Исследование, разработка и внедрение в производство литейных формовочных смесей на основе комплексных неорганических связующих с целью повышения их технологических свойств // Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Комсомольск-на-Амуре, 2009. — 36 с.
- Севастьянов Г.М. Моделирование напряженно-деформированного состояния при заливке и затвердевании металла в керамической оболочковой форме // Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Владивосток, 2011. — 16 с.
- Сапченко И.Г. Теория и практика формирования пористых структур в литье по выплавляемым моделям // Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Комсомольск-на-Амуре, 2011. — 32 с.
- Юсипов Р.Ф., Рыбкин В.А., Степанов Ю.А. Стенд для контроля деформаций керамических оболочковых форм // Литейное производство. 1981. № 5. С. 32 — 33.
- Голенков Ю.В., Рыбкин В.А., Юсипов Р.Ф. Силовое взаимодействие опорного материала с оболочкой формы при литье по выплавляемым моделям // Литейное производство. 1988. № 2. С. 14 — 15.

13. Шпиндлер С.С., Неуструев А.А., Мамлеев Р.Ф. Исследование термомеханических свойств оболочковых форм по выплавляемым моделям // Литейное производство. 1983. № 3. С. 19 – 20.
14. Васин Ю.П., Лонзингер В.А. Расчет термостойкости оболочек при литье по выплавляемым моделям // Литейное производство. 1987. № 2. С. 19 – 21.
15. Тимофеев Г.И., Огорельцев В.П., Черепнин А.Ю. Влияние температурного фактора на напряженно-деформированное состояние оболочковой формы // Изв. вуз. Черная металлургия. 1990. № 8. С. 69 – 71.
16. Grigorenko Y.M., Vasilenko A.T., Pankratova N.D. Stress state and deformability of composite shells in the three-dimensional statement // Mechanics of Composite Materials. 1985. Vol. 20. No. 4. P. 468 – 474.
17. Kulikov G.M. Influence of anisotropy on the stress state of multilayer reinforced shells // Soviet Applied Mechanics. 1987. Vol. 22. No. 12. P. 1166 – 1170.
18. Zveryaev E.M., Berlinov M.V., Berlinova M.N. The integral method of definition of basic tension condition anisotropic shell // Int. Journal of Applied Engineering Research. 2016. Vol. 11. No. 8. P. 5811 – 5816.
19. Grigorenko Ya.M., Grigorenko A.Ya., Zakhariichenko L.I. Analysis of influence of the geometrical parameters of elliptic cylindrical shells with variable thickness on their stress-strain state // Int. Applied Mechanics. 2018. Vol. 54. No. 2. P. 155 – 162.
20. Krasovsky V.L., Lykhachova O.V., Bessmertnyi Ya.O. Deformation and stability of thin-walled shallow shells in the case of periodically non-uniform stress-strain state. – In: Proc. of the 11th Int. Conference «Shell Structures: Theory and Applications». 2018. Vol. 4. P. 251 – 254.
21. Gerasimenko P.V., Khodakovskiy V.A. Numerical algorithm for investigating the stress-strain state of cylindrical shells of railway tanks // Vestnik of the St. Petersburg university: Mathematics. 2019. Vol. 52. No. 2. P. 207 – 213.
22. Meish V.F., Maiborodina N.V. Stress state of discretely stiffened ellipsoidal shells under a nonstationary normal load // Int. Applied Mechanics. 2018. Vol. 54. No. 6. P. 675 – 686.
23. Maksimuk V.A., Storozhuk E.A., Chernyshenko I.S. Stress state of flexible composite shells with reinforced holes // Int. Applied Mechanics. 2014. Vol. 50. No. 5. P. 558 – 565.
24. Vetrov O.S., Shevchenko V.P. Study of the stress-strain state of orthotropic shells under the action of dynamical impulse loads // Journal of Mathematical Sciences. 2012. Vol. 183. No. 2. P. 231 – 240.
25. Rogacheva N.N. The effect of surface stresses on the stress-strain state of shells // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. 2016. Vol. 80. No. 2. P. 173 – 181.
26. Banichuk N.V., Ivanova S.Yu., Makeev E.V. On the stress state of shells penetrating into a deformable solid // Mechanics of Solids. 2015. Vol. 50. No. 6. P. 698 – 703.
27. Maksimuk V.A., Mulyar V.P., Chernyshenko I.S. Stress state of thin spherical shells with an off-center elliptic hole // Int. Applied Mechanics. 2003. Vol. 39. No. 5. P. 595 – 598.
28. Vasilenko A.T., Sudavtsova G.K. The stress state of stiffened shallow orthotropic shells // International Applied Mechanics. 2001. Vol. 37. No. 2. P. 251 – 262.
29. Vasilenko A.T., Urusova G.P. The stress state of anisotropic conic shells with thickness varying in two directions // Int. Applied Mechanics. 2000. Vol. 35. No. 5. P. 631 – 638.
30. Nemish Yu.N., Zirka A.I., Chernopiskii D.I. Theoretical and experimental investigations of the stress-strain state of nonthin cylindrical shells with rectangular holes // Int. Applied Mechanics. 2000. Vol. 36. No. 12. P. 1620 – 1625.
31. Rogacheva N.N. The effect of surface stresses on the stress-strain state of shells // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. 2016. Vol. 80. No. 2. P. 173 – 181.
32. Tovstik P.E., Tovstik T.P. Two-dimensional linear model of elastic shell accounting for general anisotropy of material // Acta Mechanica. 2014. Vol. 225. No. 3. P. 647 – 661.
33. Storozhuk E.A., Chernyshenko I.S., Kharenko S.B. Elastoplastic deformation of conical shells with two circular holes // Int. Applied Mechanics. 2012. Vol. 48. No. 3. P. 343 – 348.
34. Marchuk A.V., Gnidash S.V. Analysis of the effect of local loads on thick-walled cylindrical shells with different boundary conditions // Int. Applied Mechanics. 2016. Vol. 52. No. 4. P. 368 – 377.
35. Ivanov V.N., Imomnazarov T.S., Farhan I.T.F., Tiekolo D. Analysis of stress-strain state of multi-wave shell on parabolic trapezoidal plan // Advanced Structured Materials. 2020. Vol. 113. P. 257 – 262.
36. Петров В.В., Аласкаров Н.И., Одинокое В.И. Расчет напряжений и деформаций в оболочковой форме при затвердевании отливки // Литейное производство. 2000. № 3. С. 53 – 55.
37. Евстигнеев А.И., Петров В.В., Одинокое В.И., Салина М.В. Математическое моделирование процесса кристаллизации металла в оболочковой осесимметричной форме // Изв. вуз. Черная металлургия. 2005. № 9. С. 41 – 45.
38. Одинокое В.И., Севастьянов Г.М., Сапченко И.Г. Эволюция напряженного состояния керамической формы при нестационарном внешнем тепловом воздействии // Математическое моделирование. 2010. Т. 22. № 11. С. 97 – 108.
39. Севастьянов Г.М., Одинокое В.И., Сапченко И.Г. Трещинообразование в керамических формах при заливке металла // Деформация и разрушение материалов. 2010. № 10. С. 25 – 28.
40. Математическое моделирование сложных технологических процессов / В.И. Одинокое, Б.Г. Каплунов, А.В. Песков, А.В. Баков. – М.: Наука, 2008. – 176 с.
41. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012661389. ОДИССЕЙ // Одинокое В.И., Прокудин А.Н., Сергеева А.М., Севастьянов Г.М. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 13.12.2012.

Поступила в редакцию 5 декабря 2019 г.
После доработки 13 апреля 2020 г.
Принята к публикации 15 мая 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. VOL. 63. NO. 9, pp. 742–754.

CHOICE OF MATERIALS PROPERTIES AND OF SHELL MOLDS STRUCTURE BY INVESTMENT MODELS

V.I. Odinokov¹, E.A. Dmitriev¹, A.I. Evstigneev^{1,2}, A.V. Sviridov¹, E.P. Ivankova¹

¹Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Khabarovsk Territory, Russia

²Khabarovsk Federal Research Center (Institute of Metallurgy and Mechanical Engineering Far-Eastern Branch of RAS, Komsomolsk-on-Amur, Khabarovsk Territory, Russia

Abstract. The paper presents a mathematical model optimizing the choice of material and morphological structure of the shell mold (SM), which has the highest resistance to cracking when pouring liquid metal into it. To solve this problem, the theory of small elastoplastic deformations and the heat equation, as well as proven numerical methods, were used. The objective function min – max was constructed from control variables characterizing the properties of the molding material of the shell. The process of heating an axisymmetric shell mold was consi-

dered when pouring liquid metal into it. The resistance of the shell form was estimated by the stresses arising in it. An algorithm for solving this problem was compiled. Using numerical schemes and program complexes developed in previous studies, an algorithm for solving the optimization problem was constructed and the values of control variables were found in which the shell mold does not break even in the presence of a rigid process – pouring steel into a cold shell mold. Analysis of the influence of weight of each of the found parameters on the value of the constructed objective function is given. Using a mathematical experiment, the morphological structure of the shell mold was studied. The shell mold of five layers is considered. The corrected system of equations makes it possible to take into account the properties of the layers made of different materials. Calculations were performed when the layer of the shell mold from material found by optimization occupies different positions in its cross section. In this case, the remaining layers of the mold are made of traditional ceramics. The optimal location of this layer was found. It is shown that the presence of several layers with the found properties does not affect the increase in crack resistance of the shell mold.

Keywords: shell mold, material properties, stress, deformation, displacement, temperature.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-9-742-754

REFERENCES

- Ivanov V.N., Kazennov S.A., Kurchman B.S. etc. *Lit'e po vyplavlyayemy modelyam* [Lost Wax Casting]. Shkennik Ya.I., Ozerov V.A. eds. Moscow: Mashinostroyeniye, 1984, 408 p. (In Russ.).
- Evstigneev A.I., Odinkov V.I., Petrov V.V., Dmitriev E.A. *Matematicheskoe modelirovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya obolochkovykh form po vyplavlyayemy modelyam: monografiya* [Mathematical Modeling of the Stress-Strain State of Shell Molds by Investment Models: Monograph]. Vladivostok: Dal'nauka, 2009, 140 p. (In Russ.).
- Sapchenko I.G., Nekrasov S.A., Zhilin S.G., Shtern M.V. *Napryazhenno-deformirovannoe sostoyaniye obolochkovykh form v lit'e po vyplavlyayemy modelyam* [Stress-Strain State of Shell Molds in Investment Casting]. Komsomol'sk-on-Amur: IMiM DVO RAN, 2005, 156 p. (In Russ.).
- Savinov A.S. *Metodicheskie osnovy otsenki i prognozirovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya sistemy "otlivka-forma" dlya preduprezhdeniya obrazovaniya goryachikh treshchin v fazonnykh otlivkakh: avtoref. diss. ... dokt. tekhn. nauk* [Methodological foundations for assessing and predicting the stress-strain state of the casting-mold system to prevent the formation of hot cracks in shaped castings: Extended Abstract of Dr. Sci. Diss.]. Magnitogorsk, 2016, 42 p. (In Russ.).
- Alaskarov Nofal Isa ogly. *Issledovaniye struktury i svoystv obolochkovykh form po vyplavlyayemy modelyam pri ikh prokalivani, zalivke rasplavom i kristallizatsii otlivok: avtoref. diss. ... dokt. tekhn. nauk* [Investigation of the structure and properties of shell molds by investment models during their calcination, melt casting and crystallization of castings: Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.]. Komsomol'sk-on-Amur, 1997, 18 p. (In Russ.).
- Petrov V.V. *Teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy upravleniya svoystvami modelei i form v lit'e po udalyayemy modelyam dlya polucheniya kachestvennykh otlivok: avtoref. diss. ... dokt. tekhn. nauk* [Theoretical and technological foundations of managing the properties of models and molds in casting on removable models to obtain high-quality castings: Extended Abstract of Dr. Sci. Diss.]. Komsomol'sk-on-Amur, 2002, 44 p. (In Russ.).
- Salina M.V. *Kompleksnoye issledovaniye vliyaniya vakuumirovaniya na razmerno-geometricheskuyu tochnost' i fiziko-mekhanicheskie svoystva modelei i obolochkovykh form s tsel'yu polucheniya kachestvennykh tochnykh otlivok v lit'e po vyplavlyayemy modelyam: avtoref. diss. ... dokt. tekhn. nauk* [A comprehensive study of the effect of evacuation on dimensional-geometric accuracy and physico-mechanical properties of models and shell molds with the aim of obtaining high-quality accurate castings in investment casting: Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.]. Komsomol'sk-on-Amur, 2005, 24 p. (In Russ.).
- Dmitriev E.A. *Issledovaniye, razrabotka i vnedreniye v proizvodstvo liteynykh formovochnykh smesei na osnove kompleksnykh neorganicheskikh svyazuyushchikh s tsel'yu povysheniya ikh tekhnologicheskikh svoystv: avtoref. diss. ... dokt. tekhn. nauk* [Research, development and implementation in the production of foundry molding mixtures based on complex inorganic binders in order to improve their technological properties: Extended Abstract of Dr. Sci. Diss.]. Komsomol'sk-on-Amur, 2009, 36 p. (In Russ.).
- Sevast'yanov G.M. *Modelirovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya pri zalivke i zatverdevanii metalla v keramicheskoi obolochkovoi forme: avtoref. diss. ... dokt. tekhn. nauk* [Modeling of the stress-strain state during pouring and solidification of metal in a ceramic shell form: Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.]. Vladivostok, 2011, 16 p. (In Russ.).
- Sapchenko I.G. *Teoriya i praktika formirovaniya poristykh struktur v lit'e po vyplavlyayemy modelyam: avtoref. diss. ... dokt. tekhn. nauk* [Theory and practice of the formation of porous structures in investment casting: Extended Abstract of Dr. Sci. Diss.]. Komsomol'sk-on-Amur, 2011, 32 p. (In Russ.).
- Yusipov R.F., Rybkin V.A., Stepanov Yu.A. Testing facility for controlling deformations of ceramic shell molds. *Liteinoe proizvodstvo*. 1981, no. 5, pp. 32–33. (In Russ.).
- Golenkov Yu.V., Rybkin V.A., Yusipov R.F. Force interaction of the support material with the shell mold during investment casting. *Liteinoe proizvodstvo*. 1988, no. 2, pp. 14–15. (In Russ.).
- Shpindler S.S., Neustruev A.A., Mamleev R.F. Investigation of thermomechanical properties of shell molds using investment models. *Liteinoe proizvodstvo*. 1983, no. 3, pp. 19–20. (In Russ.).
- Vasin Yu.P., Lonzinger V.A. Calculation of heat resistance of shells during investment casting. *Liteinoe proizvodstvo*. 1987, no. 2, pp. 19–21. (In Russ.).
- Timofeev G.I., Ogorel'tsev V.P., Cherepnin A.Yu. Influence of temperature factor on stress-strain state of shell mold. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1990, no. 8, pp. 69–71. (In Russ.).
- Grigorenko Y.M., Vasilenko A.T., Pankratova N.D. Stress state and deformability of composite shells in the three-dimensional statement. *Mechanics of Composite Materials*. 1985, vol. 20, no. 4, pp. 468–474.
- Kulikov G.M. Influence of anisotropy on the stress state of multi-layer reinforced shells. *Soviet Applied Mechanics*. 1987, vol. 22, no. 12, pp. 1166–1170.
- Zveryaev E.M., Berlinov M.V., Berlinova M.N. The integral method of definition of basic tension condition anisotropic shell. *Int. Journal of Applied Engineering Research*. 2016, vol. 11, no. 8, pp. 5811–5816.
- Grigorenko Ya.M., Grigorenko A.Ya., Zakhariichenko L.I. Analysis of influence of the geometrical parameters of elliptic cylindrical shells with variable thickness on their stress-strain state. *Int. Applied Mechanics*. 2018, vol. 54, no. 2, pp. 155–162.
- Krasovsky V.L., Lykhachova O.V., Bessmertnyi Ya.O. Deformation and stability of thin-walled shallow shells in the case of periodically non-uniform stress-strain state. In: *Proc. of the 11th Int. Conference «Shell Structures: Theory and Applications»*. 2018, vol. 4, pp. 251–254.
- Gerasimenko P.V., Khodakovskiy V.A. Numerical algorithm for investigating the stress-strain state of cylindrical shells of railway tanks. *Vestnik of the St. Petersburg University: Mathematics*. 2019, vol. 52, no. 2, pp. 207–213.
- Meish V.F., Maiborodina N.V. Stress state of discretely stiffened ellipsoidal shells under a nonstationary normal load. *Int. Applied Mechanics*. 2018, vol. 54, no. 6, pp. 675–686.
- Maximuk V.A., Storozhuk E.A., Chernyshenko I.S. Stress state of flexible composite shells with reinforced holes. *Int. Applied Mechanics*. 2014, vol. 50, no. 5, pp. 558–565.

24. Vetrov O.S., Shevchenko V.P. Study of the stress-strain state of orthotropic shells under the action of dynamical impulse loads. *Journal of Mathematical Sciences*. 2012, vol. 183, no. 2, pp. 231–240.
25. Rogacheva N.N. The effect of surface stresses on the stress-strain state of shells. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2016, vol. 80, no. 2, pp. 173–181.
26. Banichuk N.V., Ivanova S.Yu., Makeev E.V. On the stress state of shells penetrating into a deformable solid. *Mechanics of Solids*. 2015, vol. 50, no. 6, pp. 698–703.
27. Maksimyuk V.A., Mulyar V.P., Chernyshenko I.S. Stress state of thin spherical shells with an off-center elliptic hole. *Int. Applied Mechanics*. 2003, vol. 39, no. 5, pp. 595–598.
28. Vasilenko A.T., Sudavtsova G.K. The stress state of stiffened shallow orthotropic shells. *Int. Applied Mechanics*. 2001, vol. 37, no. 2, pp. 251–262.
29. Vasilenko A.T., Urusova G.P. The stress state of anisotropic conic shells with thickness varying in two directions. *Int. Applied Mechanics*. 2000, vol. 35, no. 5, pp. 631–638.
30. Nemish Yu.N., Zirka A.I., Chernopiskii D.I. Theoretical and experimental investigations of the stress-strain state of nonthin cylindrical shells with rectangular holes. *Int. Applied Mechanics*. 2000, vol. 36, no. 12, pp. 1620–1625.
31. Rogacheva N.N. The effect of surface stresses on the stress-strain state of shells. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2016, vol. 80, no. 2, pp. 173–181.
32. Tovstik P.E., Tovstik T.P. Two-dimensional linear model of elastic shell accounting for general anisotropy of material. *Acta Mechanica*. 2014, vol. 225, no. 3, pp. 647–661.
33. Storozhuk E.A., Chernyshenko I.S., Kharenko S.B. Elastoplastic deformation of conical shells with two circular holes. *Int. Applied Mechanics*. 2012, vol. 48, no. 3, pp. 343–348.
34. Marchuk A.V., Gnidashev S.V. Analysis of the effect of local loads on thick-walled cylindrical shells with different boundary conditions. *Int. Applied Mechanics*. 2016, vol. 52, no. 4, pp. 368–377.
35. Ivanov V.N., Imomnazarov T.S., Farhan I.T.F., Tiekolo D. Analysis of stress-strain state of multi-wave shell on parabolic trapezoidal plan. *Advanced Structured Materials*. 2020, vol. 113, pp. 257–262.
36. Petrov V.V., Alaskarov N.I., Odionokov V.I. Calculation of stresses and strains in the shell mold during casting solidification. *Liteinoe proizvodstvo*. 2000, no. 3, pp. 53–55. (In Russ.).
37. Evstigneev A.I., Petrov V.V., Odionokov V.I., Salina M.V. Mathematical modeling of metal crystallization in a shell axisymmetric mold. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2005, no. 9, pp. 41–45. (In Russ.).
38. Odionokov V.I., Sevast'yanov G.M., Sapchenko I.G. Evolution of stress state of ceramic mold under unsteady external thermal exposure. *Matematicheskoe modelirovanie*. 2010, vol. 22, no. 11, pp. 97–108. (In Russ.).
39. Sevast'yanov G.M., Odionokov V.I., Sapchenko I.G. Cracking in ceramic molds at metal pouring. *Deformatsiya i razrushenie materialov*. 2010, no. 10, pp. 25–28. (In Russ.).
40. Odionokov V.I., Kaplunov B.G., Peskov A.V., Bakov A.V. *Matematicheskoe modelirovanie slozhnykh tekhnologicheskikh protsessov* [Mathematical Modeling of Complex Technological Processes]. Moscow: Nauka, 2008, 176 p. (In Russ.).
41. Odionokov V.I., Prokudin A.N., Sergeeva A.M., Sevast'yanov G.M. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM no. 2012661389. ODISEI* [Certificate of state registration of computer programs No. 2012661389. ODYSSEY]. Registered in the Computer Software Registry 13/12/2012. (In Russ.).

Information about the authors:

V.I. Odionokov, Dr. Sci. (Eng.), Professor-Consultant, Chief Researcher of the Department of Research Activities (79122718858@yandex.ru)
E.A. Dmitriev, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Rector (rector@knastu.ru)
A.I. Evstigneev, Dr. Sci. (Eng.), Dr. Sci. (Eng.), Professor-Consultant, Chief Researcher of the Department of Research Activities (diss@knastu.ru)
A.V. Sviridov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Engineering Metallurgy" (andrey1979_2009@mail.ru)
E.P. Ivankova, Senior Lecturer of the Chair "Industrial Electronics" (jenyvany@mail.ru)

Received December 5, 2019
 Revised April 13, 2020
 Accepted May 15, 2020