

**Иванкова Е. П.**

**E. P. Ivankova**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ  
И СТРУКТУРЫ МНОГОСЛОЙНЫХ ОБОЛОЧКОВЫХ ФОРМ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ  
МОДЕЛЯМ**

**MODELING AND OPTIMIZATION OF CHOOSING PROPERTIES OF MATERIALS  
AND STRUCTURE OF MULTILAYER SHELL SHAPES BY MELT-OUT MODELS**

**Иванкова Евгения Павловна** – старший преподаватель кафедры «Промышленная электроника» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: jenyvany@mail.ru.

**Evgenia P. Ivankova** – Senior Lecturer, Industrial Electronics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: jenyvany@mail.ru.

**Аннотация.** Представлена математическая модель процесса оптимизации выбора материала многослойной оболочковой формы, обладающего наибольшей сопротивляемостью к трещинообразованию при заливке её жидким металлом. С помощью математического эксперимента проведено исследование морфологического строения оболочковой формы. Рассмотрена оболочковая форма из пяти слоёв. Скорректированная система уравнений позволяет учитывать свойства слоёв, выполненных из разных материалов. Осуществлены расчёты, 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 слоёв с найденными свойствами не влияет на повышение трещиностойкости оболочковой формы.

**Summary.** A mathematical model of the process of optimizing the choice of material for a multilayer shell mold, which has the highest resistance to cracking when it is filled with liquid metal, is presented. A mathematical experiment was used to study the morphological structure of the shell form. A shell form of five layers is considered. The adjusted system of equations allows one to take into account the properties of layers made of different materials. Calculations have been made when the shell mold layer from the material found by optimization occupies different positions in the mold section; the rest of the mold layers are made of traditional ceramics. The optimal location of this layer has been found. It is shown that the presence of several layers with the found properties does not affect the increase in the crack resistance of the shell shape.

**Ключевые слова:** многослойная оболочковая форма, трещиностойкость, свойства материалов, напряжённое состояние материалов, деформация, температура.

**Key words:** multilayer shell mold, crack resistance, material properties, stress state of materials, deformation, temperature.

УДК 621.74.045

Работа выполнена под руководством доктора технических наук доцента Э. А. Дмитриева, при участии доктора технических наук профессора В. И. Одинокова и доктора технических наук профессора А. И. Евстигнеева.

Качество фасонных отливок оценивается по таким параметрам, как точность и чистота поверхности. Причиной образования трещин в оболочковых формах (ОФ) по выплавляемым моделям (ВМ) является напряжённо-деформированное состояние (НДС) на различных этапах формообразования.

Для повышения трещиностойкости за счёт снижения НДС необходимо выделить физические параметры материала, наиболее сильно влияющие на появление трещин ОФ при её заливке

жидким металлом. Построение математической модели процесса заливки жидкого металла в ОФ позволяет найти оптимальные параметры системы и спрогнозировать возможность управления структурно-морфологическим строением ОФ.

Опубликовано большое количество теоретических и экспериментальных работ [1-4], которые посвящены исследованию НДС ОФ по ВМ, а также системы отливка – форма.

В настоящее время прорабатываются и развиваются вопросы НДС по новым модифицированным структурам ОФ и их особенностям. Именно этому вопросу и посвящена настоящая работа, а в качестве объекта исследования взята многослойная ОФ по ВМ.

В работе [5] изложены теоретические основы математического моделирования НДС ОФ по ВМ, как монослойных, так и многослойных, поэтому автор счёл обоснованным дать только анализ и результаты расчётов.

Расчётная схема задачи представлена на рис. 1 со следующими геометрическими параметрами:  $T = 5$  мм;  $H = 50$  мм;  $R_1 = 20$  мм.

Рассмотрим пятислойную ОФ (см. рис. 1), штриховкой показан внутренний слой ОФ со свойствами  $\alpha = 0,12 \cdot 10^{-6}$  град $^{-1}$ ;  $G = 2000$  кг/мм $^2$ ;  $\lambda = 0,001$  Вт/(мм $\cdot$ °С);  $C = 1350$  Дж/(кг $\cdot$ °С);  $\gamma = 4,0 \cdot 10^{-6}$  кг/мм $^3$ , остальные слои обладают следующими физическими свойствами [5]:

$$G = 2960 \text{ кг/мм}^2; \alpha = 0,51 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1};$$

$$\lambda = 0,000812 \text{ Вт/(мм} \cdot \text{°С)}; C = 840 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°С)}; \gamma = 2,0 \cdot 10^{-6} \text{ кг/мм}^3. \quad (1)$$

Исходная система уравнений будет аналогична системе монослойных ОФ [5] с той лишь разницей, что уравнения будут записаны со своими физическими параметрами по каждому слою:

$$\sigma_{ij,j} = 0; \sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij} = 2G_p \varepsilon_{ij}^*; \varepsilon_{ij}^* = \varepsilon_{ij} - \frac{1}{3} \varepsilon \delta_{ij}; \varepsilon = \varepsilon_{ij};$$

$$\varepsilon_{ij} = 3k_p^t \sigma + 3\alpha_p^t (\theta_n - \theta_p^*); \varepsilon_{ij} = 0,5(U_{i,j} + U_{j,i}); \dot{\theta} = \bar{\alpha}_2 \Delta \theta; \quad (2)$$

$$(i, j = 1, 2, 3),$$

где  $\sigma_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) – компоненты тензора напряжений;  $U_i$  – перемещения;  $\varepsilon_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) – компоненты тензора упругих деформаций;  $\sigma$  – гидростатическое напряжение;  $G_p$  ( $p = 2, 3$ ) – модуль сдвига; при  $p = 2$  – металла,  $p = 3$  – слоистой формы, причём  $G_3 = \{G_3^t\}$ , где  $t$  – номер слоя;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера;  $k_p^t$  – коэффициент объёмного сжатия;  $\alpha_p^t$  – коэффициент линейного расширения в области (III) в слое ( $t$ );  $\bar{\alpha}_p$  – коэффициент теплопроводности в области ( $p$ ),  $p = 1, 2$ ;  $\theta_n$  – текущая температура;  $\theta_p^*$  – начальная температура в области ( $p$ ).

Решение системы уравнений (2) [5] осуществляется с теми же начальными и граничными условиями, что и ранее, с использованием численных методов, описанных в работе [6].

В настоящей работе проведены расчёты разлива металлов в ОФ, в которой характеристики физических свойств некоторых слоёв соответствуют найденным ранее в работе [5].

Результаты теоретических расчётов приведены на рис. 2-4.

При найденном значении  $\alpha = 0,12 \cdot 10^{-6}$  град $^{-1}$  было принято:  $G = 8000$  кг/мм $^2$ ;  $a^* = 0,2$  мм $^2$ /с. То есть взяты более жёсткие

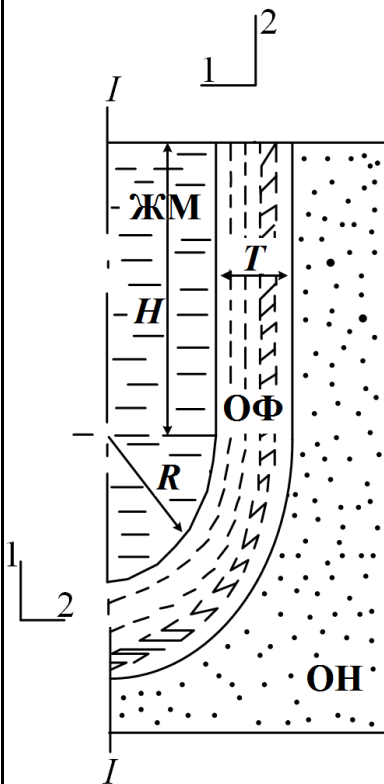


Рис. 1. Схема пятислойной оболочковой формы в меридиальном сечении с учётом осевой симметрии:  
ЖМ – жидкий металл;  
ОФ – оболочковая форма;  
ОН – опорный наполнитель

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 расчётов получено, что наиболее рационально 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. 2 приведены эпюры  $\sigma_{22}$  при разливке алюминия в холодную форму (сплошными линиями показаны эпюры  $\sigma_{22}$  при разливке алюминия в однослойную форму со свойствами (1), пунктирными – эпюры  $\sigma_{22}$  при разливке в пятислойную ОФ со свойствами  $G = 8000 \text{ кг/мм}^2$ ;  $a^* = 0,2 \text{ мм}^2/\text{с}$ ).

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

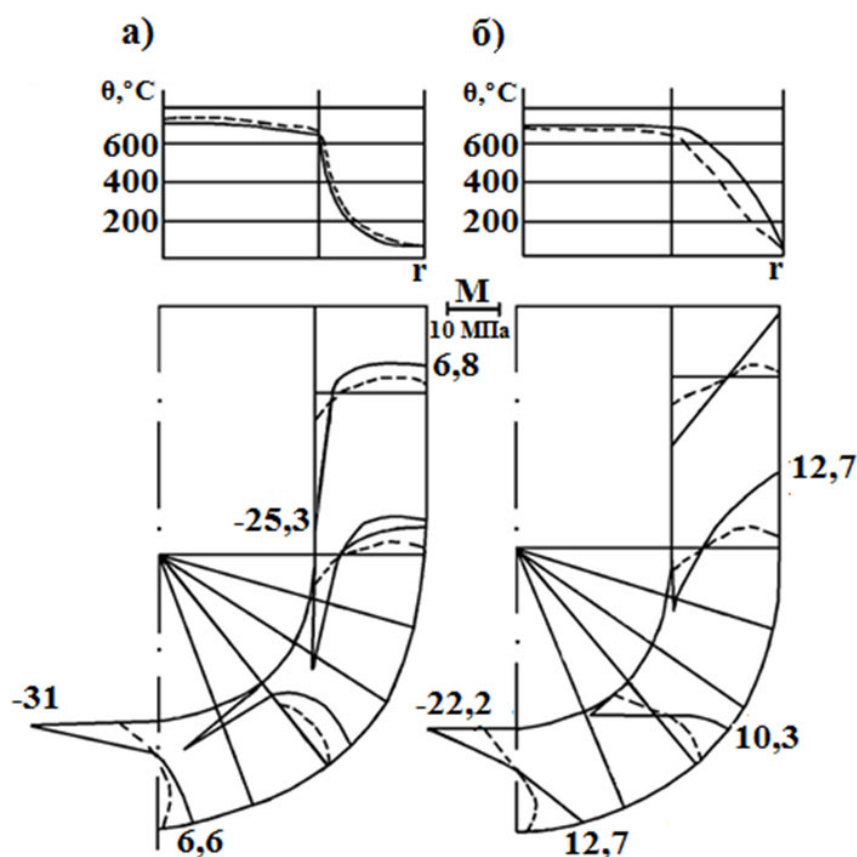


Рис. 2. Эпюры напряжений  $\sigma_{22}$  по толщине оболочковой формы при заливке алюминия в холодную форму: а – при  $\tau_{\text{охл}} = 0,45 \text{ с}$ ; б – при  $\tau_{\text{охл}} = 2,62 \text{ с}$

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

Пятислойная ОФ, характеризуемая свойствами  $G = 8000 \text{ кг/мм}^2$ ;  $a^* = 0,2 \text{ мм}^2/\text{с}$ , выдерживает нагрузку без разрушения.

На рис. 3 представлены результаты разливки стали в горячую форму ( $\theta_{\text{ф}} = 700 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Наибольшие растягивающие напряжения  $\sigma_{22}$  при использовании традиционной формы (сплошные линии на рис. 3) составляют 21,8 МПа при  $\tau = 24 \text{ с}$ , а в пятислойной ОФ (пунктирные линии на рис. 3)  $\sigma_{22} = 5,3 \text{ МПа}$  в срединном сечении цилиндрической части. Видим, что разрушений в обоих случаях нет, но пятислойная ОФ работает значительно надёжнее.

На рис. 4 представлены значения  $\sigma_{22}$  при разливке стали в холодную форму. Традиционная форма разрушается (сплошные линии), а пятислойная ОФ со слоем, свойства которого  $G = 8000 \text{ кг/мм}^2$ ;  $a^* = 0,2 \text{ мм}^2/\text{с}$ , выдерживает нагрузку без разрушения. Наибольшие значения

напряжений  $\sigma_{22}$  в традиционной форме на оси симметрии при  $\tau = 1,65$  с составляют 52 МПа. Напряжения  $\sigma_{22}$  в цилиндрической части при  $\tau = 18,65$  с составляют 25 МПа, а при наличии слоя со свойствами  $G = 8000$  кг/мм<sup>2</sup>;  $a^* = 0,2$  мм<sup>2</sup>/с значения  $\sigma_{22}$  невелики, значит, при этом ОФ тоже не разрушается. Напряжения  $\sigma_{22}$  на оси симметрии при  $\tau = 1,65$  с составляют 14,3 МПа, в срединном сечении цилиндрической части при  $\tau = 1,65$  с  $\sigma_{22} = 6,7$  МПа (здесь приведены максимальные значения  $\sigma_{22}$  по абсолютной величине).

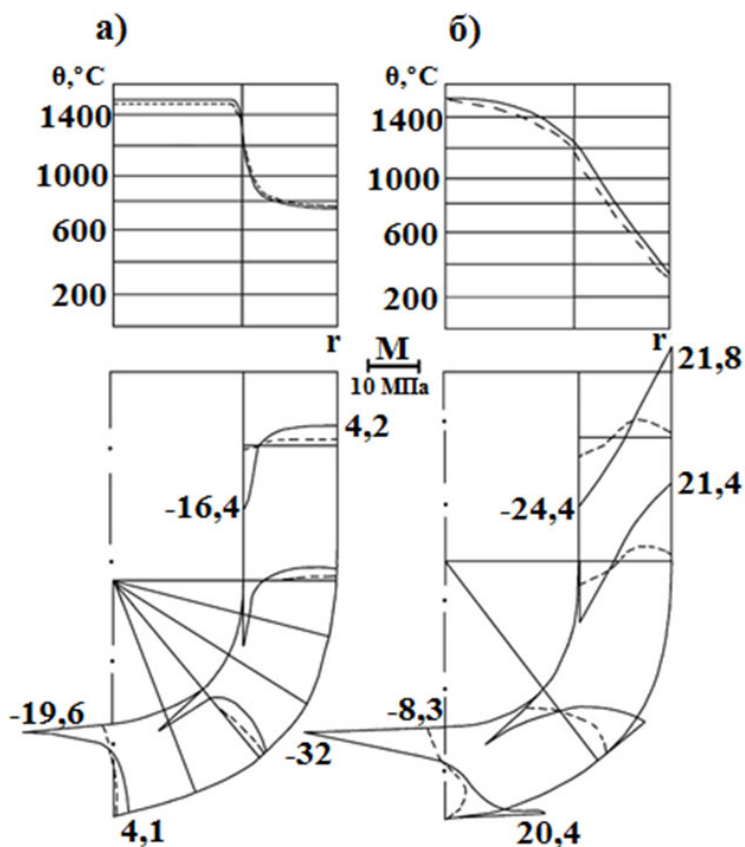


Рис. 3. Эпюры напряжений  $\sigma_{22}$  по толщине оболочковой формы при заливке стали в горячую форму: а – при  $\tau_{\text{охл}} = 0,25$  с; б – при  $\tau_{\text{охл}} = 34$  с

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

По внутренней образующей ОФ сжимающие напряжения имеют наибольшие значения в осевом сечении, уменьшаются в цилиндрической части ОФ. Растягивающие напряжения  $\sigma_{22}$  на наружной поверхности ОФ имеют примерно одну и ту же величину, изменяясь только во времени (см. рис. 2).

Сжимающие напряжения  $\sigma_{22}$  формы со слоем (см. рис. 1) имеют тот же характер, что и сжимающие напряжения в традиционной форме, но в 3-4 раза меньше по абсолютной величине, а растягивающие напряжения  $\sigma_{22}$  достигают своего максимального значения внутри сечения, ближе к середине, они примерно одинаковы по образующей и увеличиваются во времени.

При разливке стали в горячую (см. рис. 3) и холодную (см. рис. 4) формы качественная тенденция распределения напряжений  $\sigma_{22}$  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 (см. рис. 3)) и при  $\tau = 18,6$  с

(разливка стали в холодную форму (см. рис. 4)). Растягивающие напряжения  $\sigma_{22}$  также увеличиваются во времени по внешней образующей при использовании традиционной формы и в середине сечения при использовании формы со слоем.

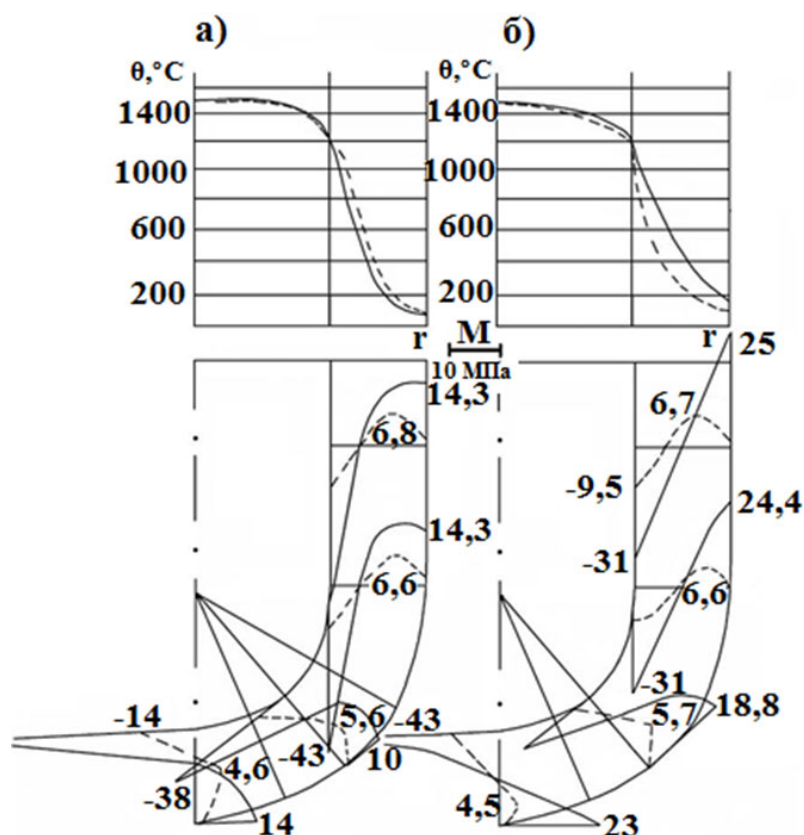


Рис. 4. Эпюры напряжений  $\sigma_{22}$  по толщине оболочковой формы при заливке стали в холодную форму: а – при  $\tau_{\text{охл}} = 1,65$  с; б – при  $\tau_{\text{охл}} = 18,65$  с

Таким образом, проведённые теоретические исследования показывают, что многослойная ОФ, изготовленная из керамического материала, обладающего физическими свойствами (1) со слоем вблизи наружной поверхности с физическими свойствами  $G = 8000$  кг/мм<sup>2</sup>,  $a^* = 0,2$  мм<sup>2</sup>/с при  $\alpha = 0,12 \cdot 10^{-6}$  град<sup>-1</sup> вполне пригодна для заливки любого металла.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Литьё 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 напряжённо-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. Напряжённо-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.
4. Савинов, А. С. Методические основы оценки и прогнозирования напряжённо-деформированного состояния системы «отливка-форма» для предупреждения образования горячих трещин в фасонных отливках: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Савинов Александр Сергеевич. – Магнитогорск, 2016. – 42 с.
5. Моделирование и оптимизация выбора свойств материалов и морфологического строения структуры оболочковых форм по выплавляемым моделям / В. И. Одинокоев, Э. А. Дмитриев, А. И. Евстигнеев и др. // Чёрная металлургия. – 2020. – № 9. – С. 742-754.
6. Математическое моделирование сложных технологических процессов / В. И. Одинокоев, Б. Г. Каплунов, А. В. Песков, А. В. Баков. – М.: Наука, 2008. – 176 с.