Евстигнеев А. И., Одинокоев В. И., Свиридов А. В., Дмитриев Э. А., Петров В. В.
A. I. Evstigneev, V. I. Odinokov, A. V. Sviridov, E. A. Dmitriev, V. V. Petrov

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МОНОСЛОЙНЫХ ЭЛЕКТРОФОРЕТИЧЕСКИХ ОБОЛОЧКОВЫХ ФОРМ

MATHEMATICAL MODELING OF THE MODE DEFORMATION OF MONOLAYER ELECTROPHERIC SHELLS FORMS

Евстигнеев Алексей Иванович – заслуженный деятель науки Российской Федерации, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681005, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, 1; тел.: +7 (4217) 54-95-69; +7 (4217) 54-95-38. E-mail: mail@imim.ru.
Mr. Aleksey I. Evstigneev – Doctor of Engineering, Professor, Chief Researcher, Institute of Machinery and Metallurgy, Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681005, Khabarovsk region, Komsomolsk-on-Amur, 1 Metallurgists' str.; tel.: +7 (4217) 54-95-69; +7 (4217) 54-95-38. E-mail: mail@imim.ru.

Одинокоев Валерий Иванович – заслуженный деятель науки Российской Федерации, доктор технических наук, профессор-консультант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: diss@knastu.ru.
Mr. Valery I. Odinokov – Doctor of Engineering, Professor, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk region, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: diss@knastu.ru.

Свиридов Андрей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроения и металлургии Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: mim@knastu.ru.
Mr. Andrey V. Sviridov – PhD in Engineering, Associate professor, Mechanical Engineering and Metallurgy Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk region, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: mim@knastu.ru.

Дмитриев Эдуард Анатольевич – доктор технических наук, профессор, ректор Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: office@knastu.ru.
Mr. Eduard A. Dmitriev – Doctor of Engineering, Professor, Rector of Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk region, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: office@knastu.ru.

Петров Виктор Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры технологии переработки нефти и полимеров Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: tnp@knastu.ru.
Mr. Viktor V. Petrov – Doctor of Engineering, Professor, Oil and Polymer Processing Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk region, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: tnp@knastu.ru.

Аннотация. В работе рассмотрена математическая модель напряжённно-деформированного состояния процесса затвердевания металла отливки после его заливки в однослойную (моноконтинуальную) электрофоретическую оболочковую форму (ОФ). Представлен общий алгоритм моделирования напряжённно-деформированного состояния моноконтинуальных электрофоретических форм, получены расчётные распределения напряжений в электрофоретической оболочковой форме при моделировании плавного её нагрева. Установлена наибольшая вероятность возникновения трещин в средних слоях холодных электрофоретических форм.

Summary. The authors study mathematical model of the mode deformation of a casting metal solidification after its casting into a single-layered monolithic electrophoretic shell. A general algorithm for simulating the mode deformation of monolayer electrophoretic forms is presented. Calculated stress distributions in the electrophoretic shells are presented when modelling its smooth heating. The greatest probability of occurrence of cracks in middle layers of cold electrophoretic forms is established.

Ключевые слова: напряжённно-деформированное состояние, электрофоретическая оболочковая форма, моделирование нагрева, металл, упругопластические деформации, Эйлера система координат, фазовый переход.

Key words: mode of deformation, electrophoretic shell shape, heating simulation, metal, elastoplastic deformations, Eulerian coordinate system, phase transition.

УДК 621.74

Работа выполнена в рамках государственного задания № 007-00285-18-00.

Повышение конструктивной сложности и точности литых деталей, наряду с требованиями минимизации трудовых затрат, ресурсосбережения и эффективной защиты окружающей среды, значительно влияет на направления развития технологий производства отливок. Постоянное повышение требований к качеству литых изделий сказывается и на требованиях, предъявляемых к литейным формам.

В представленной работе построена математическая модель напряжённно-деформированного состояния (НДС) процесса затвердевания металла отливки после его заливки в однослойную (монокристаллическую электрофоретическую) оболочковую форму. При этом использовалась та же система дифференциальных уравнений, что и в работе [4], только в осесимметричном виде.

Решение задачи осуществлялось тем же численным методом по программе «Одиссей», что и в работах [4; 5].

При разработке математической модели процесса учитывалось, что моделируемая система на начальном этапе является двухкомпонентной: жидкий металл – форма. С течением времени за счёт изменения температурных полей система переходит в трёхкомпонентную: жидкий металл I (ЖМ) – твёрдый металл II (ТМ) – форма III (см. рис. 1). Моделирование взаимодействия этих трёх компонентов в изменяющемся со временем поле температур при наличии заданного давления жидкого металла на форму P_1 и являлось целью данной работы.

Рассматривается осесимметричное тело вращения. Движение считается медленным. Имеем трёхкомпонентную систему. Деформируемая среда – затвердевший металл (область II) и форма (область III) – изотропные материалы. Процесс – нестационарный. Используя теорию малых упругопластических деформаций и Эйлерову систему координат для каждой из областей, получим систему уравнений [1; 5]:

Область I:

$$\begin{aligned}\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma_{33} = \sigma = P_1, \\ \theta = a_1 \Delta \theta.\end{aligned}\quad (1)$$

Области II, III:

Рис. 1. Схема расположения областей системы: I – жидкий металл; II – затвердевший металл; III – форма; P_1 и P_2 – силы давления на оболочковую форму со стороны металла и опорного наполнителя

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

где δ_{ij} – символ Кронекера; G_p ($p = \text{II}, \text{III}$) – модуль сдвига металла ($p = \text{II}$) и формы ($p = \text{III}$); ε_{ij} – деформации; k_p – коэффициенты объёмного сжатия; σ – гидростатическое напряжение; α_p – коэффициенты линейного расширения; θ_n – текущая температура; θ_p^* – начальные температуры в областях $p = \text{I}, \text{II}, \text{III}$; $U_{i,j}$ – перемещения; a_p – коэффициенты температуропроводности ($p = \text{I}, \text{II}, \text{III}$); τ – время.

В процессе охлаждения жидкого металла при условии, что температура металла $\theta_M \leq \theta_K$ (θ_K – температура кристаллизации), определяется толщина затвердевшего слоя из решения уравнения межфазового перехода:

$$\frac{d\theta_1}{dn} \lambda_1 - \frac{\theta_2}{dn} \lambda_2 = \frac{d\Delta}{d\tau} L \rho, \tag{3}$$

где θ_1 и θ_2 – температуры соответственно в твёрдой и жидкой фазах; λ_1 и λ_2 – коэффициенты теплопроводности в соответствующих фазах; Δ – толщина корочки; L – скрытая теплота плавления; ρ – плотность; n – нормаль к границе двух фаз.

Время процесса кристаллизации τ_* разбивается на малые шаги $\Delta\tau_n$ (n – номер временного шага). На каждом временном шаге $\Delta\tau_n$ вычисляется толщина твёрдой фазы Δ_n ($\Delta = \sum_1^n \Delta_n$).

При этом предполагается, что значение температуры в твёрдой фазе по толщине Δ_n изменяется по линейному закону и градиент температуры в жидкой фазе равен нулю. С учётом этого решение уравнения (3) даёт следующую зависимость для определения толщины закристаллизовавшейся корочки Δ_n на временном шаге $\Delta\tau_n$:

$$\Delta_n = C \sqrt{\Delta\tau_n}, \quad C = \sqrt{\frac{2\Delta\theta_1\lambda_1}{\rho L}}. \tag{4}$$

Здесь $\Delta\theta_1$ – перепад температур в твёрдой фазе вблизи фронта кристаллизации.

При осевой симметрии имеем

$$\sigma_{31} = \sigma_{32} = 0; \quad \varepsilon_{13} = \varepsilon_{23} = 0; \quad U_3 = 0. \tag{5}$$

В соответствии с работой [5] уравнения (2) и значения ε_{ij} с учётом (5) будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned}S_{13}\Delta S_{12}(\sigma_{11} - \sigma_{22}) + S_{12}\Delta S_{13}(\sigma_{11} - \sigma_{33}) + 0,5\Delta\sigma_{11}S_{12}S_{13} + \\ + 0,5\Delta\sigma_{12}S_{21}S_{23} + (S_{21}\Delta S_{23} + 2S_{23}\Delta S_{21})\sigma_{12} = 0, \\ S_{21}\Delta S_{23}(\sigma_{22} - \sigma_{33}) + S_{23}\Delta S_{21}(\sigma_{22} - \sigma_{11}) + 0,5\Delta\sigma_{22}S_{23}S_{21} + \\ + 0,5\Delta\sigma_{21}S_{12}S_{13} + (S_{12}\Delta S_{13} + 2S_{13}\Delta S_{12})\sigma_{21} = 0;\end{aligned}\tag{6}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{11} - \sigma_{22} &= 2G_p (\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22}), \\ \sigma_{22} - \sigma_{33} &= 2G_p (\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33});\end{aligned}\quad (7)$$

$$\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} = 3k_p \sigma + 3\alpha_p (\theta_n - \theta_p^*). \quad (8)$$

Здесь $\sigma_{ij} = 0,5(\sigma_{ij}^1 + \sigma_{ij}^2)$, $\Delta\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^2 - \sigma_{ij}^1$, $(i, j = 1, 2, 3)$, тогда

$$\begin{aligned}\varepsilon_{11} &= \frac{2\Delta U_1}{S_{21}} + \frac{2U_2}{S_{21}} \cdot \frac{\Delta S_{21}}{S_{12}}; \quad \varepsilon_{22} = \frac{2\Delta U_2}{S_{32}} + \frac{2U_1}{S_{12}} \cdot \frac{\Delta S_{12}}{S_{21}}; \\ \varepsilon_{33} &= \frac{2U_1}{S_{13}} \cdot \frac{\Delta S_{13}}{S_{31}} + \frac{2U_2}{S_{23}} \cdot \frac{\Delta S_{23}}{S_{32}}.\end{aligned}\quad (9)$$

Здесь $U_i = U_i^1 + U_i^2$, $\Delta U_i = U_i^2 - U_i^1$, $(i = 1, 2)$.

При этом S_{ik}^j , $(i, k = 1, 2, 3; j = 1, 2)$ – величина дуги средней линии, расположенной на грани j вдоль координаты α_k и перпендикулярной координате α_i . Значения S_{ik}^j вычисляются как средние от значений дуг границы граней. Вводятся обозначения $S_{ij} = S_{ij}^1 + S_{ij}^2$, $\Delta S_{ij} = S_{ij}^2 - S_{ij}^1$. Расположение σ_{ij} и U_i по граням элемента показано на рис. 2.

Рис. 2. Расположение σ_{ij} и U_i по граням элемента:

а – распределение напряжений; б – распределение перемещений

Уравнения (6), (9) записаны с учётом того, что $\frac{\partial U_1}{\partial x_3} = 0$, $\frac{\partial \sigma_{3i}}{\partial x_3} = 0$; $i = 1, 2, 3$; для тел вращения имеют место $\Delta S_{31} = 0$; $\Delta S_{32} = 0$; $\frac{\Delta \bar{U}_1}{S_3} = 0$, $\frac{\Delta \bar{U}_2}{S_3} = 0$; $U_3 = 0$; на поверхности $x_1 x_3$: $S_1^+ - S_1^- = 0$; на поверхности $x_2 x_3$: $S_2^+ - S_2^- = 0$ сдвиговые значения ε_{ij} ($i \neq j$) запишутся для узла сетки в следующем виде:

$$\varepsilon_{12}^0 = \frac{2\Delta \bar{U}_2}{S_1} - 0,5\bar{U}_2 \frac{S_2^+ - S_2^-}{S_1 S_2} + \frac{2\Delta \bar{U}_1}{S_2} - 0,5\bar{U}_1 \frac{S_1^+ - S_1^-}{S_1 S_2}, \quad (10)$$

где $S_i = S_i^1 + S_i^2$; $\Delta \bar{U}_i = \bar{U}_i^2 - \bar{U}_i^1$; $S_i^+ = S_i^{1+} + S_i^{2+}$; $S_i^- = S_i^{1-} + S_i^{2-}$; значения $\bar{U}_i^j$ вычисляются как средние от значений U_i по граням элемента. В работе [5] доказано, что разностный аналог систем (6)–(8), с учётом (9) при наличии начальных и граничных условий, является определяемым. Размерность систем (6)–(8) значительно сокращается при осуществлении следующих операций:

1. Разности $(\sigma_{ii} - \sigma_{jj})$ в уравнениях (6) выражаются через (7).
 2. Уравнение сохранения массы переписывается в рекуррентной форме с учётом выражений (9) в виде $U_1^2 = U_1^1 + [A]$, где $[A]$ – оператор, не содержащий U_1^2 ; направление обхода области по $x_1 (\rightarrow)$, по $x_2 (\uparrow)$.
 3. Определяются сдвиговые выражения ε_{ij} ($i \neq j$) по внутренним узлам сетки в соответствии с формулами (10); $i = 1, j = 2$.
 4. Определяются σ_{ij} ($i \neq j$) по внутренним узлам сетки из уравнений состояния: $\sigma_{12}^0 = G_p^0 \varepsilon_{12}^0$.
 5. Определяются σ_{ij} по внешним узлам сетки из граничных условий, а на контактных поверхностях – из закона трения.
 6. Определяются σ_{ij} по граням элементов как средние от значений σ_{ij} в узлах граней.
 7. Первое уравнение (6) переписывается в рекуррентном виде: $\sigma_{11}^1 = \sigma_{11}^2 + [B]$, где $[B]$ – оператор, не содержащий σ_{11}^1 , направление обхода области $x_1 (\leftarrow)$, $x_2 (\downarrow)$.
 8. Из системы уравнений – второе уравнение в системе (6) и уравнение $\sigma_{22} - \sigma_{11} = 2\lambda(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})$ – определяются значения σ_{22}^1 и σ_{22}^2 для элемента и составляются уравнения вида $F_3 = (\sigma_{22}^2)_{JJ} - (\sigma_{22}^1)_{JJ+1} = 0$ для внутренних граней, где J – индекс элемента по координате x_2 .
- Таким образом, если положить за независимые переменные $X = \{U_2, U_1|_{x_1=0}, \sigma_{11}|_{x_1=x_1^*}\}$, то, пропуская последовательность (1÷7), можно определить зависимые переменные через X (x_1^* – конечное значение координаты x по криволинейной области).
- Эквивалентная система уравнений состоит из

$$\begin{aligned} F_1 &= (U_1^2 - U_1^*)|_{x_1=x_1^*} = 0, \\ F_2 &= (\sigma_{11}^1 - \sigma_{11}^*)|_{x_1=0} = 0, \\ F_3 &= 0. \end{aligned}$$

Здесь U_1^* – известные из граничных условий перемещения U_1 на границе области ($x_1 = x_1^*$); σ_{11}^* – известные из граничных условий напряжения σ_{11} на границе области ($x_1 = 0$). Причём уравнений $F_1 = 0$ столько, сколько неизвестных $\sigma_{11}|_{x_1=x_1^*}$, а уравнений $F_2 = 0$ столько, сколько неизвестных $U_1|_{x_1=0}$.

Для решения уравнения теплопроводности используется численный метод, разработанный в работе [1]. В соответствии с данным методом для каждого внутреннего k -го элемента записывается система теплопроводности в разностном виде и строится итерационная процедура, которая с учётом того, что тепловой поток по x_3 равен нулю, представляется итерационной формулой:

$$\theta_k = \frac{\theta_k^* + t_{12}\theta_1^+ + t_{11}\theta_1^- + t_{22}\theta_2^+ + t_{21}\theta_2^-}{1 + t_{12} + t_{11} + t_{22} + t_{21}}, \quad (11)$$

где $t_{12} = \frac{2(\lambda_k + \lambda_1^+)}{S_{21} + S_{21}^+} F_1^2 \frac{\Delta\tau}{C_k \gamma_k V_k}$; $t_{11} = \frac{2(\lambda_k + \lambda_1^-)}{S_{21} + S_{21}^-} F_1^1 \frac{\Delta\tau}{C_k \gamma_k V_k}$; $t_{22} = \frac{2(\lambda_k + \lambda_2^+)}{S_{12} + S_{12}^+} F_2^2 \frac{\Delta\tau}{C_k \gamma_k V_k}$; $t_{21} = \frac{2(\lambda_k + \lambda_2^-)}{S_{12} + S_{12}^-} \times$
 $\times F_2^1 \frac{\Delta\tau}{C_k \gamma_k V_k}$; $F_i^j = S_{ik}^j \cdot S_{ip}^j$; $i \neq k \neq p$; $i, k, p = 1, 2, 3$; $j = 1, 2$; $V_k = \frac{S_{13} S_{12} (S_{21} + S_{31})}{16}$.

Здесь θ_k^* – средняя температура в k -м элементе в начале временного шага $\Delta\tau$; λ_k , θ_k , C_k , γ_k – соответственно средние значения коэффициента теплопроводности, температуры, теплоёмкости и удельный вес в k -м элементе в конце временного шага $\Delta\tau$; λ_i^-, θ_i^- ($i=1,2$) – соответственно коэффициент теплопроводности и температуры в элементе, следующем за элементом k по координате x_i в отрицательную сторону; λ_i^+, θ_i^+ – аналогичные параметры в положительном направлении x_i . $S_{21}^- = S_{21}^{1-} + S_{22}^{2-}$; $S_{21}^+ = S_{21}^{1+} + S_{22}^{2+}$; S_{ij}^{1+} ($i \neq j$; $i, j=1,2$) – длина дуги S_{ij}^1 -элемента, следующего за элементом k в положительном направлении по координате x_j ; S_{ij}^{1-} – то же, но в отрицательном по x_j ; θ_i^+ – температура в элементе, следующем за элементом k в направлении x_i ; θ_i^- – то же, но в отрицательном направлении x_i .

Общий алгоритм моделирования НДС монослойных электрофоретических форм [2; 3]:

1. Время охлаждения τ^* разбивается на конечное число шагов: $\tau^* = \sum \Delta\tau_n$; n – номер временного шага.
2. Исследуемая область разбивается на конечное число ортогональных элементов.
3. Задаются начальные и граничные условия по элементам, образующим рассматриваемую область, и константы физико-механических свойств материалов.
4. Вычисляются длины дуг элементов S_{ik}^j ($i, k=1,2$; $i \neq k$; $j=1,2$).
5. Определяется поле температур на временном шаге $\Delta\tau_n$ численным решением уравнения теплопроводности с использованием итерационной формулы (11) при наличии начальных и граничных условий на данном временном шаге.
6. Если температура в области (I) у поверхности S_2 $\theta|_{S_2} \leq \theta_{II}^*$, то вычисляется толщина закристаллизовавшейся корочки Δ_n по формуле (4). Если $\theta|_{S_2} > \theta_{II}^*$, то выполняется операция по пункту 7.
7. Решается система уравнений (2) с учётом разностных аналогов (6), (7), (9) и разработанной методики, описанной в работе [1]. Определяются поля напряжений σ_{ij} и перемещений U_i ($i, j=1,2$).
8. Производится шаг времени. Если $\sum \Delta\tau_n < \tau^*$, то выполняется операция по пункту 4. Если $\sum \Delta\tau_n = \tau^*$ – процесс вычисления закончен.

При моделировании толщину ОФ условно разбили на четыре равных слоя и в дальнейшем изменение напряжений и деформаций контролировали на границах этих слоёв. С помощью математической модели исследовались два режима нагрева и прокаливания: 1) нагрев ОФ при помещении её в разогретую до температуры 800 °С печь; 2) нагрев ОФ вместе с печью со скоростью 50 °С/мин [2].

Сопоставляя данные о градиентах температур между условными слоями ОФ и расчётное распределение напряжений в слоях формы, было замечено, что максимальные напряжения в форме возникают не во время максимального градиента температур, а несколько позже. Достижение максимума напряжений происходит при температурах, соответствующих температурам фазового перехода кварца.

При моделировании плавного нагрева электрофоретической ОФ были получены расчётные распределения напряжений в электрофоретической ОФ, которые изменяются практически с той же закономерностью, что и напряжения в ОФ, нагреваемой в горячей печи. Отличия заключаются лишь в величинах полученных напряжений.

Так, при нагреве ОФ в горячей печи расчётные максимальные напряжения в ОФ значительно выше, чем максимальные напряжения в ОФ, нагреваемой совместно с печью с заданной скоростью.

Анализ полученных расчётных данных об НДС электрофоретических ОФ во время прокаливания показал, что основными факторами, влияющими на трещинообразование электрофоретических ОФ во время их нагрева и прокали, являются скорость нагрева ОФ и фазовое расширение кварцевой основы оболочки.

Также было установлено, что после заливки формы металлом напряжения во всех условных слоях ОФ сжимающие. В прилегающих к отливке слоям сжимающие напряжения в первый момент времени резко возрастают и также резко исчезают за счёт плавления связующего. По мере прогрева ОФ до температур свыше 800 °С напряжения, возникшие в ней, релаксируются за счёт перехода разогретых слоёв формы в пластичное состояние.

Напряжения, возникающие в слоях холодных ОФ, после заливки жидким металлом значительно выше по величине таких же напряжений, возникающих при заливке в горячую форму. Высокие напряжения в ОФ, появляющиеся при их заливке жидким металлом, обусловлены возникающим значительным перепадом температур по толщине ОФ, а также возникающим при температуре 600 °С фазовым расширением кварцевой основы ОФ [2; 3].

Выводы

На основе уравнений теплопроводности и механики сплошных сред с использованием численного метода построена математическая модель НДС монослойной электрофоретической оболочковой формы, которая позволяет рассчитывать температурные поля и напряжённо-деформированное состояние оболочковой формы на стадии прокаливания и заливки её жидким металлом.

В результате анализа расчётных данных установлено, что на НДС электрофоретических ОФ во время прокали большое влияние оказывает скорость нагрева ОФ и, как следствие, перепад температур по толщине формы. Установлено, что наибольшая вероятность образования трещин в электрофоретических формах возникает в средних слоях холодных форм, заливаемых жидким металлом за счёт высоких напряжений, вызванных фазовым расширением кварца при температуре около 600 °С.

ЛИТЕРАТУРА

1. Математическое моделирование сложных технологических процессов / В. И. Одинокоев, Б. Г. Каплунов, А. В. Песков, А. В. Баков. – М.: Наука, 2008. – 176 с.
2. Евстигнеев, А. И. Математическое моделирование напряжённо-деформированного состояния оболочковых форм при литье по выплавляемым моделям / А. И. Евстигнеев, В. И. Одинокоев, В. В. Петров, Э. А. Дмитриев. – Владивосток: Дальнаука, 2009. – 130 с.
3. Евстигнеев, А. И. Расчёт оболочковых форм, полученных методом электрофореза / А. И. Евстигнеев, В. И. Одинокоев, Э. А. Дмитриев // Литейное производство. – 2009. – № 1 – С. 29-33.
4. Theoretical prediction of crack formation in axisymmetric multilayer shell molds. Materials Science Forum / A. I. Evstigneev, V. I. Odinkov, A. V. Sviridov, E. A. Dmitriev, V. V. Petrov. – Vol. 857. – P. 573-577.
5. Mathematical modelling of stress-strain state of multilayer shell molds / A. I. Evstigneev, V. I. Odinkov, A. V. Sviridov, E. A. Dmitriev, V. V. Petrov // Materials Science Forum. – Vol. 857. – P. 565-572.