

где

$$K_1(\theta) = (E^{-1}(\theta) + z_1(\theta - 0,5)z_5 + z_2(1 - \theta)z_3), \quad K_2(\theta) = z_2'(1 - \theta)z_3,$$

$$K_3(\theta) = (z_1 - E(\theta); E^2(\theta))\theta + z_1\theta z_5, \quad S = \sum_{i,j} \delta_{ij}, \quad \varepsilon = S^3,$$

$\sigma_{ij} = (\sigma_{ij} - \sigma_j^2)$, δ_{ij} — символ Кронекера, $\theta = T/T_0$ — безразмерная температура, z_i — постоянные аппроксимации (точка обозначает дифференцирование по времени).

Для рассматриваемого диапазона изменения температуры модуль упругости и коэффициент теплового расширения можно аппроксимировать следующими выражениями [1]:

$$E(\theta) = E_0 \exp(-\delta_0 T); \quad \alpha(\theta) = \alpha_1 + \alpha_2 T, \quad (2)$$

где E_0 , δ_0 , α_1 , α_2 — постоянные аппроксимации.

Учитывая, что в исследуемой части технологической линии непрерывной разливки толщина корки слитка является малой величиной, температурное поле можно аппроксимировать следующим выражением:

$$\theta = \theta_0 - \theta_1(0,5 + z(H(t))^{-1}) \exp(\lambda t), \quad (3)$$

где $\theta_0 = T_0/T_n$, $\theta_1 = T_p/2T_n$, $H(t) = k|T$, T_p — параметр, определяющий температуру поверхности слитка в начале ЭВО, k — коэффициент кристаллизации, λ — параметр, определяющий интенсивность наружного охлаждения, $H(t)$ — толщина корки слитка в момент времени t .

Применяя метод последовательных приближений Пикара к уравнению [1], можно его решить относительно напряжений, что позволяет на основе известных допущений теории тонких оболочек получить основные зависимости между компонентами внутренних силовых факторов и деформационного состояния срединной поверхности для цилиндрической оболочки при наличии высокотемпературной ползучести

$$N_{ij} = D_{ij}(t, t)(\varepsilon_{ij} - \nu\varepsilon) - N_T(t, t) - \int_0^t \left((\varepsilon_{ij} - \nu\varepsilon) \frac{\partial D_{ij}(t, \tau)}{\partial \tau} + \delta_{ij} N_T(t, \tau) \right) d\tau, \quad (4)$$

$$M_{ij} = D_{ij}(t, t)(\gamma_{ij} - \nu\chi) - M_T(t, t) - \int_0^t \left((\gamma_{ij} - \nu\chi) \frac{\partial D_{ij}(t, \tau)}{\partial \tau} + \delta_{ij} M_T(t, \tau) \right) d\tau.$$

где

$$\varepsilon = \sum_{i,j} \varepsilon_{ij}, \quad \chi = \sum_{i,j} \gamma_{ij}, \quad D_{ij} = \frac{1}{1-\nu^2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \exp(-F(t-\tau)) K_1^{-1}(\theta, \tau) dz,$$

$$D_3 = \frac{1}{1-\nu^2} \int_{-H/2}^{H/2} \exp(-F(t-\tau)) K_1^{-1}(H, \tau) (z - z_0(t))^2 dz.$$

$$N_r(t, \tau) = \frac{1}{1-\nu} \int_{-H/2}^{H/2} \exp(-F(t-\tau)) K_1^{-1}(H, \tau) (\alpha(H) T) dz,$$

$$M_r(t, \tau) = \frac{1}{1-\nu} \int_{-H/2}^{H/2} \exp(-F(t-\tau)) K_1^{-1}(H, \tau) (\alpha(H) T) (z - z_0(t)) dz.$$

$$F(\tau) = z_0^2(H^2 \delta^2 (E^{-1}(H) + z_0(H - 0.5)\delta^2 + z_0(1-H)\delta^2)^{-1}.$$

Аналогично [6] введем неизвестную комплексную функцию N , с помощью которой определяются внутренние усилия и компоненты деформации срединной поверхности оболочки. Удовлетворяя условиям неразрывности деформаций и беря в качестве временной температурную функцию в функции $\gamma(t)$, получаем разрешающее дифференциальное уравнение поставленной задачи

$$\begin{aligned} \nabla \bar{N} + \frac{\partial^2 \bar{N}}{\partial \varphi^2} + i2b^2 \frac{\partial^2 \bar{N}}{\partial x^2} - 2b^2 \left[\gamma \left(R \gamma \varphi' + \frac{1}{R(1+\nu)} \left(\frac{\partial^2}{\partial \tau^2} + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + \nabla \nabla \right) M_r^* - \frac{1-\nu}{(2b^2)^2} \left(\frac{\sigma}{\partial \varphi} - \nu \right) N_r^* \right) + \frac{2b^2}{R(1-\nu)} \left(\frac{\sigma'}{\partial \varphi^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \right. \right. \\ \left. \left. - \nu \right) M_r^* - \frac{1}{2b^2} \left(\frac{\sigma^2}{\partial \varphi^2} + \nabla \nabla \right) N_r^* \right], \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$2b^2 = R(D_2/(1-\nu^2)D_3)^{1/2}, \quad Q^* = Q - \int_{t_0}^t \frac{Q}{F_0} \exp(-F(t-t_0)) dt.$$

R —радиус кривизны оболочки, F_0 —среднее значение функции в интервале (t_0, t) .

Решая полученное уравнение (5) при граничных условиях, моделирующих взаимодействие направляющих механизмов со слитком в ЗВО, и удовлетворяя условиям контактирования между собой широких граней слитка коробчатого сечения [1], получаем выражения внутренних силовых факторов с компоненты вектора перемещений, которые из-за громоздкости здесь не приводятся.

Разработан алгоритм численной реализации решения задачи и составлена программа на алгоритмическом языке FORTRAN-IV, которая позволяет определить напряженно-деформационное состояние корки слитка с учетом истории нагружения по всей длине ЗВО и нарастания толщины корки во времени. Разработанный алгоритм учитывает как влияние основных технологических параметров процесса непрерывной

разливки, так и конструктивных параметров машины непрерывного литья на прочностное состояние корки с учетом зависимости деформативных и прочностных характеристик заданной стали от температуры и времени.

Числовые вычисления приведены для стали со следующими деформативными и теплофизическими характеристиками: $\alpha_1 = 1,15 \cdot 10^{-5} (^{\circ}\text{C})^{-1}$; $\alpha_2 = 10^{-4} (^{\circ}\text{C})^{-1}$; $E_0 = 0,7 \cdot 10^5 \text{ МПа}$; $\delta_0 = 0,67 \cdot 10^{-3}$; $k = 2,75 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$; $z_1 = 5,333 \cdot 10^{-4}$; $z_2 = 0,709 \cdot 10^{-4}$; $z_3 = 7$; $z_4 = 2,54 \cdot 10^{-4}$; $z_5 = 1,04 \cdot 10^{-4}$; $z_6 = 5$; $z_7 = 15$.

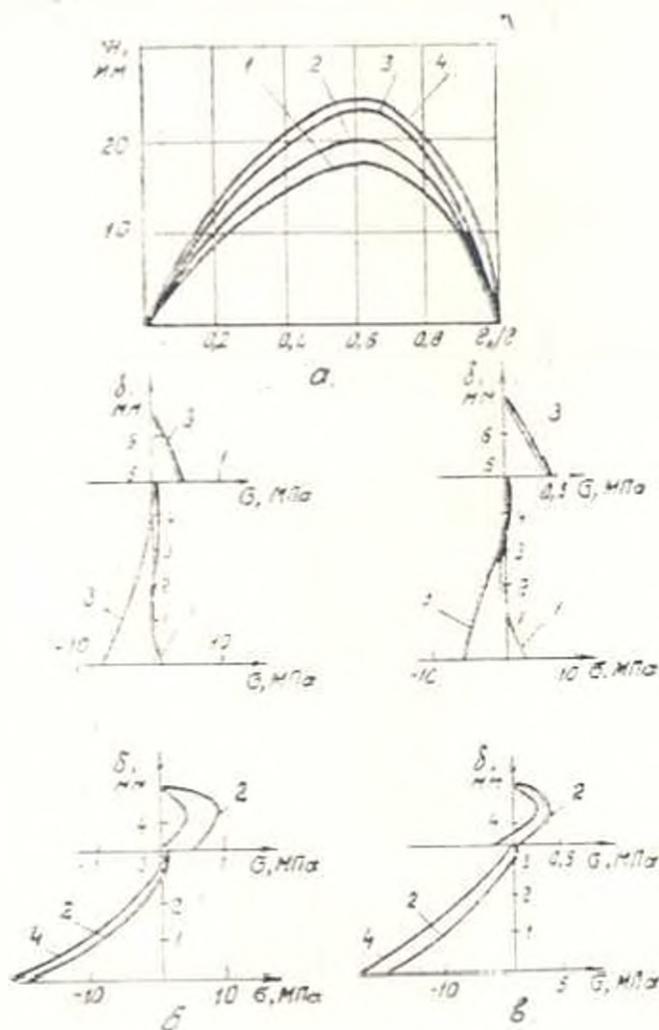


Рис. 2. Прогобы (а) и профи напряжений под роликами (б) для пролета $l = 15$. 1 — $v = 0,5 \text{ м/мин}$, $t = 3 \cdot 10^{-4} \text{ с}$; 2 — $v = 1 \text{ м/мин}$, $t = 5 \cdot 10^{-4} \text{ с}$; 3 — $v = 0,5 \text{ м/мин}$, $t = 10^{-4} \text{ с}$; 4 — $v = 1 \text{ м/мин}$, $t = 10^{-4} \text{ с}$.

На рис. 2 приведены графики изменения прогибов для межроликового расстояния с порядковым номером 15 и для профиля распределения на-

пряжения под роликовой парой в конце того же пролета, при начальном радиусе кривизны слитка $R=10$ и ширине слитка $L=2$ м для различных значений скорости разливки и интенсивности наружного охлаждения.

Результаты вычислений показывают, что увеличение скорости разливки приводит к существенному росту прогибов корки слитка и росту величин растягивающих напряжений, возникающих в зоне соприкосновения корки с жидкой фазой, где по существующим натурным наблюдениям возникают внутренние трещины. На основе проведенного анализа можно утверждать, что при соответственном подборе скорости разливки и интенсивности охлаждения наружной поверхности слитка можно предотвращать или довести до минимума возможность возникновения внутренних трещин в непрерывнолитом слэбе в ЗВО.

Полученные результаты использованы в НИИтяжмаш ПО «Уралмаш» при выборе оптимальных технических решений и определении параметров проектируемых машин непрерывной разливки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мурадян Л. М., Барсегян Р. Н. Напряженно-деформированное состояние корки затвердевающего слитка // Изв. АН АрмССР, Сер. ТН—1983.—Т. XXXVI, № 4.—С. 17—22.
2. Grill A., Brimacombe J. K., Wenberg F. Mathematical analysis of stresses in continuous casting of steel // Ironmaking and Steelmaking, — 1976. — № 3. — P. 36—47.
3. Kohel Fakaва, Hitomi Matsumoto. Rheologic analysis of bulging of continuously cast slabs with elementary bending theory // Teiry To Karans. — 1982. — № 7. — P. 794—798.
4. Wray P. J. Effect of carbon content on the plastic flow of plain carbon steels at elevated temperatures // Metallurgical Transactions. — 1982. — V. 13A, № 1. — P. 125—134.
5. Dorn J. E. Some fundamental experiments on high-temperature creep // Journ. Mech. Phys. Solids. — 1955. — № 2. — P. 61—69.
6. Новожилов В. В. Теория танков оболочек.—Л.: Судпромгиз, 1962—431 с.

ЕрІН им. К. Маркса

20. VIII. 1985

Изв. АН АрмССР (сер. ТН), т. XLII, № 1, 1989, с. 7—11

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 678.5:621.891

А. К. ПОГОСЯН, А. Н. КАРАПЕТЯН

ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ СОПОЛИМЕРА СФД

Приведены результаты исследования триботехнических свойств полимерных композиций на основе сополимера СФД, наполненных обычными и предварительно модифицированными минеральными наполнителями.