

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Լ. Մ. ՄԱՐԱԶԻԱՆ, Բ. Ն. ԲԱՐՏԵԳՅԱՆ

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КОРКИ
ЗАТВЕРДЕВАЮЩЕГО СЛИТКА

Определение напряженно-деформированного состояния корки затвердевающего слитка в зоне вторичного охлаждения (З. В. О.) в связи с необходимостью оптимизации основных конструктивных и технологических параметров машины в этой зоне представляет большой практический интерес. Если в первых исследованиях [1, 2] слиток рассматривался как статически неопределимая балка, то в настоящее время появилась необходимость уточнять расчетную модель. Учитывая геометрические параметры разливаемых слабов и выравнивание волнистости фронта затвердевания по мере удаления расстояния [3], в [4, 5] слиток рассматривается как тонкая оболочка коробчатого сечения с жидкой затвердевающей во времени сердцевинной.

В настоящей работе верхние и нижние слои затвердевающего слитка рассматриваются как две концентрические оболочки, а боковые стороны — балками; и учитывается изменение во времени как толщины оболочек, так и ширины балок, которое происходит по закону $k\sqrt{t}$ (k — коэффициент кристаллизации).

При удовлетворении контактных условий между балками и оболочками возникают трудности, во избежание чего эти условия заменяются равенством перемещений и углов поворота сечений балок и оболочек на середине каждого пролета, по линии их стыковки.

Связь между напряжениями и деформациями для оболочки имеет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{N_x - \nu N_y}{D_0} + \frac{N_T}{D_0}; & \varepsilon_x &= \frac{M_x - \nu M_y}{D_1} + \frac{M_T}{D_2}; \\ \varepsilon_y &= \frac{N_y - \nu N_x}{D_0} + \frac{N_T}{D_0}; & \varepsilon_y &= \frac{M_y - \nu M_x}{D_1} + \frac{M_T}{D_2}; \\ \varepsilon_{xy} &= \frac{2(1+\nu)}{D_0} M_{xy}; & \varepsilon_{xy} &= \frac{1+\nu}{D_2} M_{xy}; \\ D_0 &= \int_{-l/2}^{l/2} E(T, C) dz; & D_1 &= \int_{-l/2}^{l/2} E(T, C) z^2 dz, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где N_z , N_φ , M_z , M_φ — соответственно, усилия и моменты; N_T , M_T — усилия и моменты, возникающие от температуры:

$$N_T = \int_{-\delta/2}^{\delta/2} \alpha_T E(T, C) T(z) dz; \quad M_T = \int_{-\delta/2}^{\delta/2} \alpha_T E(T, C) T(z) z dz; \quad (2)$$

$T(z)$ — температурное поле оболочки; $E(T, C)$, α_T — соответственно, модуль упругости и коэффициент теплового расширения, которые при рассматриваемом интервале изменения температуры существенно зависят от T .

Модуль упругости может быть аппроксимирован формулой [4]:

$$E(T, C) = E_0 \exp(-\delta_0 T), \quad (3)$$

где E_0 , δ_0 — постоянные, определяемые от экспериментов.

Коэффициент теплового расширения, следуя [4], можно представить:

$$\alpha_T = \alpha_0 + \alpha_1 T(z), \quad (4)$$

где α_0 , α_1 — постоянные.

Следуя [4], можно получить выражения для перемещений, усилий и моментов. Не вникая в подробности вывода и учитывая громоздкость выражений, приведем значение только радиального перемещения w :

$$w = -\frac{1}{D_z} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\rho_n^3}{2b^2 \lambda_n^3} \left\{ \frac{1-\nu^2}{2b^2} \left(-(a_{2n} \Phi_2 + \beta \Phi_1) C_1' - (a_{1n} \Phi_2 + \beta \Phi_4) C_2' + \right. \right. \\ \left. + (a_{2n} \Psi_2 + \beta \Psi_1) C_2' + (a_{2n} \Psi_2 + \beta \Psi_4) C_1' + (a_{1n} \Phi_1 - \beta \Phi_2) C_2' + \right. \\ \left. + (a_{1n} \Phi_1 - \beta \Phi_3) C_2' + (a_{2n} \Psi_2 - \beta \Psi_2) C_3' + (a_{2n} \Psi_4 - \beta \Psi_3) C_4' + \right. \\ \left. + M_1' - \nu M_2' + \frac{2b^2}{R} M_{Tn} \right\} \sin \lambda_n x_1 + C_5 \sin \varphi;$$

где

$$M_1' = -\frac{2b^2 \lambda_n^2}{\lambda_n^4 + 4b^4} R q_T + \frac{2b^2}{R} \left(\frac{2\nu 4b^4 - (1+\nu-2\nu^2)\lambda_n^4}{(\lambda_n^4 + 4b^4)(1-\nu^2)} + \frac{1}{1-\nu} \right) M_{Tn} + \\ + \left[-(1-\nu) \frac{\lambda_n^2}{2b^2} \left(1 - \frac{\lambda_n^4}{\lambda_n^4 + 4b^4} \right) - \frac{2b^2 \lambda_n^2}{\lambda_n^4 + 4b^4} \nu \right] N_{Tn}; \\ M_{2n} = -\nu \frac{2b^2 \lambda_n^2}{\lambda_n^4 + 4b^4} R q_T + 2 \frac{2b^2}{R} \left(\frac{4b^4 - \lambda_n^4}{(1-\nu^2)(\lambda_n^4 + 4b^4)} - \frac{1}{2(1+\nu)} \right) M_{Tn} + \\ + \frac{\lambda_n^2}{2b^2} \left[\frac{4b^4 + (1-\nu)\lambda_n^4}{\lambda_n^4 + 4b^4} - (1-\nu) \right] N_{Tn}; \\ 2b^4 = \frac{R}{\left(\frac{D_0}{D_0(1-\nu^2)} \right)^{1/2}}; \quad \lambda_n = \frac{\pi n R}{L}; \quad \beta = \frac{b \lambda_n}{2};$$

$$\begin{aligned}\Phi_1 &= \operatorname{ch} C_1 \varphi \cos d_1 \varphi; & \Phi_2 &= \operatorname{sh} C_1 \varphi \sin d_1 \varphi; \\ \Phi_3 &= \operatorname{ch} C_1 \varphi \sin d_1 \varphi; & \Phi_4 &= \operatorname{sh} C_1 \varphi \cos d_1 \varphi; \\ \Psi_1 &= \operatorname{ch} C_2 \varphi \cos d_2 \varphi; & \Psi_2 &= \operatorname{sh} C_2 \varphi \sin d_2 \varphi; \\ \Psi_3 &= \operatorname{ch} C_2 \varphi \sin d_2 \varphi; & \Psi_4 &= \operatorname{sh} C_2 \varphi \cos d_2 \varphi;\end{aligned}$$

$$c_1 = \sqrt{\frac{b\lambda_n}{2}} \sqrt{V(1+f)^2 + 1} + 1 + f;$$

$$c_2 = \sqrt{\frac{b\lambda_n}{2}} \sqrt{V(1-f)^2 + 1} - 1 + f;$$

$$d_1 = \sqrt{\frac{b\lambda_n}{2}} \sqrt{V(1+f)^2 + 1} - 1 - f;$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{b\lambda_n}{2}} \sqrt{V(1-f)^2 + 1} + 1 - f;$$

$$f = \frac{\lambda_n^2 - 1/2}{b\lambda_n}.$$

Неизвестные C_i , C_i' ($i = 1, 2, 3, 4$) определяем из граничных условий оболочки, которые могут быть записаны в виде:

$$\begin{aligned}\varphi &= 0; & w_l &= \Delta b_l'; & M_{\varphi l} &= M_{0l}' + M_{pl}; & N_{\varphi l} &= N_l; & H_l &= 0; \\ \varphi &= \varphi_0; & w_{l-1} &= \Delta b_{l-1}'; & M_{\varphi l-1} &= M_{0l}' + M_{pl-1}; & N_{\varphi l} &= N_{l-1}; & H_{l-1} &= 0.\end{aligned}\quad (6)$$

Здесь индекс каждой первой роликовой пары обозначен через $i-1$, а второй— i ; $\Delta b_l'$, $\Delta b_{l-1}'$ — неправильность выставки роликов, при $j=1$ верхней оболочки со стороны малого радиуса ($R = R - r$) и при $j=2$ нижней оболочки со стороны большого радиуса ($R = R + r$); N_l — усилия вытягивания слитка; M_{pl} — изгибающие моменты от усилий, действующих под роликами на слиток; $M_{0l}' = M_0 \frac{b\delta}{h^3}$ — изгибающие моменты, возникающие от веса слитка и неправильности выставки роликов в роликовых парах.

Оставшиеся неизвестные C_5 и C_5' определяются из условия равенства перемещений, углов поворота оболочки и боковых граней в середине пролета по линии стыковки и имеют вид:

$$\begin{aligned}C_2 &= - \frac{M_{0l}' (R\varphi_{0l})^2 D_2 b^4}{2EJ_1 (1 - \nu^2) R^2 \sin \varphi_0^2}; \\ C_5 &= \frac{4D_0 D^2}{1 + \nu} \left(R^2 \frac{(1 - \nu)^2}{4D_1 b^4} + \frac{1}{2D_0} \right) C_3.\end{aligned}\quad (6)$$

Напряжения, возникающие в верхней и нижней частях непрерывного слитка, вычисляются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E(T, C)}{1 - \nu^2} \left[\frac{N_x}{D_0} + z \frac{M_x}{D_2} \right] + \\ &+ \frac{E(T, C)}{1 - \nu} \left[\frac{N_T}{D_0} + z \frac{M_T}{D_2} - \alpha_T (T - T_0) \right]; \\ \sigma_z &= \frac{E(T, C)}{1 - \nu^2} \left[\frac{N_z}{D_0} + z \frac{M_z}{D_2} \right] + \\ &+ \frac{E(T, C)}{1 - \nu} \left[\frac{N_T}{D_0} + z \frac{M_T}{D_2} - \alpha_T (T - T_0) \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

Для значений $\sigma_i = \frac{\varphi_{0i}}{10}$ напряжения рассчитываются с учетом нарастания корки слитка, т. е. для той же точки:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E(T, C)}{1 - \nu^2} \left[\frac{N_{xi+1} - N_{xi}}{D_{0i+1}} + z \frac{M_{xi+1} - M_{xi}}{D_{2i+1}} \right]; \\ \sigma_z &= \frac{E(T, C)}{1 - \nu^2} \left[\frac{N_{zi+1} - N_{zi}}{D_{0i+1}} + z \frac{M_{zi+1} - M_{zi}}{D_{2i+1}} \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

Проведены вычисления для следующих значений основных параметров: $\alpha_0 = 0,115 \cdot 10^{-4} \text{ град}^{-1}$; $\alpha_z = 0,1 \cdot 10^{-4}$; $E = 0,7 \cdot 10^6 \text{ кг/см}^2$; $\alpha_0 = 0,67 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$; $R = 1000 \text{ см}$; $L = 200 \text{ см}$; $\Delta b_i = 0,1 \text{ см}$; $k = 0,275 \text{ см/сек}$; $\nu = 0,45 \text{ м/мин}$, для двух скоростей разлива 1 м/мин и $0,5 \text{ м/мин}$, при той же интенсивности охлаждения слэба в этой зоне.

На рис. 2а и 3а приведены графики изменения напряжений и температуры по длине слэба для точек, находящихся в наиболее опасной, с точки зрения трещинообразования, области. Расположение этих точек на продольном сечении образца в начальный момент проведения расчетов показано на рис. 1. Эпюры нормальных напряжений, действующих по всей толщине корки слэба в середине поперечного сечения в пролетах II и VII показаны на рис. 2б и 3б.

Как видно из приведенных графиков (рис. 2а, 3а), увеличение скорости разлива при постоянном теплообмене приводит к увеличению зоны, подверженной влиянию растягивающих напряжений и непосредственной близости двухфазного состояния расплава. При этом повышается и температура этой зоны ($\sim 20^\circ \text{C}$). Значительно растут растягивающие напряжения, действующие на поверхности корки слэба (рис. 2б, 3б), особенно на пролетах, удаленных от мениска жидкого металла. Прогибы корки слитка в межроликовых расстояниях растут

по мере удаления от мениска. Влияние роста толщины корки за счет кристаллизации жидкого металла на прогиб для рассмотренных вариантов незначительно. Однако, значительно увеличиваются прогибы (~ 1.5 раза) при увеличении скорости разливки.

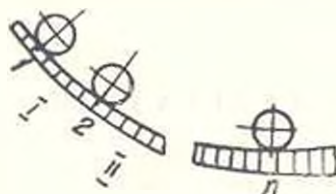


Рис. 1.

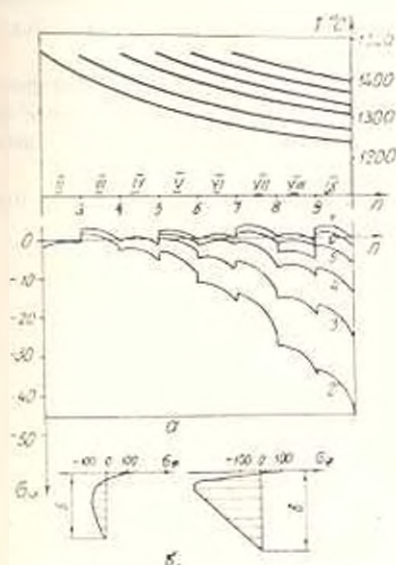


Рис. 2.

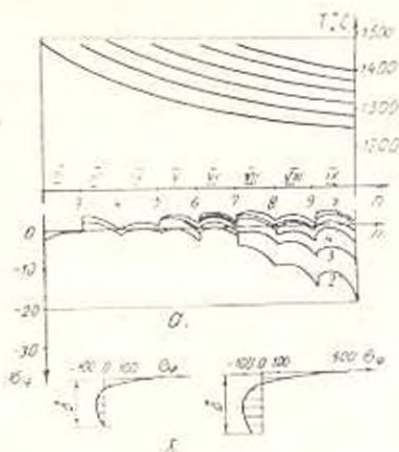


Рис. 3.

На основе проведенного анализа можно утверждать, что рост скорости разливки при неизменной интенсивности охлаждения сляба может привести к зарождению трещин вблизи зон двухфазного состояния расплава.

ЕрПН им. К. Маркса

10 VI 1983

Լ. Մ. ՄԱՐԿԱՆՅԱՆ, Ռ. Ն. ՄԱՐԿԱՆՅԱՆ

ՊԵՐԵՍՏՈՎ ԶՈՐԵԼԱՏՈՐԻ ԿԵԼԵԴԻ ԼՍՐՎԱԾԱՅԻՆ, ԵՎ
ԳԵՆԵՐԱԾԱՅԻՆ ՎԻՃԱԿԸ

Ա. մ. փ. ո. փ. ո. մ.

Քրոշված է տեղեկատվության սարքավորումների ևրկրորդային սառնեցման գոտում պնդացող համաձուլվածքի կեղևի լարվածային և զեֆորմացիոն

վիճակը: Բացահայտված է մի շարք կոնստրուկտիվ և տեխնոլոգիական գործոնների ազդեցությունը:

Խնդիրը լուծելիս պնդացող համաձուլվածքը դիտարկվել է որպես հեղուկ մետաղով լցված ուղղանկյուն կտրվածքի տուփածն թաղանթ, որի պնդացման հաշվին թաղանթի պատերի հաստությունը ժամանակից կախված փոփոխվում է:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Бровман М. Я. и др. Разработка методики расчета усилий правки слитка на радиальной установке непрерывной разливки стали.— В соб.: Труды ин-та Металлургии АН ГССР, Тбилиси, 1972, вып. 2, с. 117—125.
2. Miyazawa K., Schweedifeger K. Computation of bulging of continuous cast slabs wilst simple bending theory, Ironmaking and steelmaking, 1979, № 2, p. 68—82.
3. Сладковтеев В. Т. и др. Непрерывная разливка стали на радиальных установках.— М.: Металлургия, 1974.— 288 с.
4. Мурадян Л. М. и др. Определение допустимых условий напряженно-деформированного состояния непрерывного слитка с жидкой фазой при совместном учете конструктивных и технологических параметров машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ).— Ереван, 1978.— 94 с. (Отчет ЕрПИ).
5. Daniel S. S. Roll containment model for strand cast slabs and blooms. — Ironmaking and steelmaking, 1982, № 1, p. 16—24.