

The methods for calculation of cross pressures, formed at steel casting, in round ingot poured at MNLZ, allowing to take into account mechanical bend of ingot and thermal stresses, are offered. The dynamics of the thermal stresses along the length of ingot of circular section with diameter 160 mm and 240 mm of low-carbon steel St20 is established by means of computer modeling.

А. Н. ЧИЧКО, БНТУ, В. А. МАТОЧКИН, РУП «БМЗ», Д. М. КУКУЙ, БИТУ,  
А. В. ДЕМИН, РУП «БМЗ», О. И. ЧИЧКО, БНТУ

УДК 519:669.27

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПО ДЛИНЕ КРУГЛОГО СЛИТКА В МНЛЗ-3

Проблема расчета и моделирования напряжений первого рода (механические напряжения) и второго рода (термические напряжения), формирующихся при разливке стали в слитках, является одной из важнейших в теории металлургических процессов [1]. Анализ существующих методов показывает, что многие вопросы расчета напряжений еще не достаточно развиты, особенно с точки зрения численных методов моделирования [2]. Поэтому практические аспекты исследования динамики напряжений первого и второго рода в кристаллизующемся слитке еще недостаточно изучены. Как известно, величина напряжений в движущемся слитке зависит от скорости движения заготовки, радиуса изгиба, условий ее охлаждения в кристаллизаторе и зонах вторичного охлаждения. Размер сечения слитка, марка стали существенно влияют через упругопластические свойства сплава на процесс формирования термических напряжений.

В [3] был описан метод расчета продольных термических напряжений, формирующихся при разливке стали в круглые слитки, и исследована их динамика по длине слитка. В то же время при разливке стали наряду с продольными образуются и поперечные напряжения. Представляет научный и практический интерес исследование поперечных напряжений в слитках круглого сечения. Поэтому целью настоящей статьи является разработка метода расчета и исследования поперечных напряжений в слитках круглого сечения, получаемых при заданных тепловых и конструкционных параметрах МНЛЗ-3, используемой на РУП «БМЗ».

Как известно, поперечные напряжения, возникающие в слитке, приводят к образованию продольных трещин, в то время как продольные напряжения — к поперечным трещинам. Математическое моделирование и расчет поперечных деформаций и напряжений в слитке производили исходя из предположения, что каждый элемент горизонтального слоя слитка деформируется одинаково, причем тангенциальные напряжения относительно вертикальной оси отсутствуют. В этом случае задача расчета поперечных деформаций и напряжений может быть решена с использованием математических моделей, основанных на уравнениях равновесия [4–6]. Например, для плоскости  $XZ$  система уравнений имеет вид при движении слитка по оси  $Y$

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0, \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = 0, \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} - \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\sigma_x$ ,  $\sigma_z$  — нормальные напряжения элементов структуры по осям  $x$ ,  $z$ ;  $\tau_{zx}$ ,  $\tau_{xz}$  — тангенциальные напряжения. Напряжения вычисляли из соответствующих относительных деформаций по следующим формулам:

$$\sigma_x = \begin{cases} E_1(T)(\epsilon_x - \epsilon_{sp} - \epsilon_{sp-}), & \text{если } \epsilon_x \geq \epsilon_{u-}(T) + \epsilon_{sp} + \epsilon_{sp-} \text{ и } \epsilon_x \leq \epsilon_u(T) + \epsilon_{sp} + \epsilon_{sp-}, \\ E_1(T)\epsilon_u(T) + E_2(T)(\epsilon_x - \epsilon_u(T) - \epsilon_{sp-}), & \text{если } \epsilon_x > \epsilon_u(T) + \epsilon_{sp} + \epsilon_{sp-}, \\ E_1(T)\epsilon_{u-}(T) + E_2(T)(\epsilon_x - \epsilon_{u-}(T) - \epsilon_{sp}), & \text{если } \epsilon_x < \epsilon_{u-}(T) + \epsilon_{sp} + \epsilon_{sp-}, \end{cases} \quad (2)$$

$$\sigma_z = \begin{cases} E_1(T)(\varepsilon_z - \varepsilon_{zp} - \varepsilon_{zp-}), & \text{если } \varepsilon_z \geq \varepsilon_{u-}(T) + \varepsilon_{zp} + \varepsilon_{zp-} \text{ и } \varepsilon_z \leq \varepsilon_u(T) + \varepsilon_{zp} + \varepsilon_{zp-}, \\ E_1(T)\varepsilon_u(T) + E_2(T)(\varepsilon_z - \varepsilon_u(T) - \varepsilon_{zp-}), & \text{если } \varepsilon_z > \varepsilon_u(T) + \varepsilon_{zp} + \varepsilon_{zp-}, \\ E_1(T)\varepsilon_{u-}(T) + E_2(T)(\varepsilon_z - \varepsilon_{u-}(T) - \varepsilon_{zp}), & \text{если } \varepsilon_z < \varepsilon_{u-}(T) + \varepsilon_{zp} + \varepsilon_{zp-}, \end{cases} \quad (3)$$

$$\tau_{xz} = G\gamma_{xz}, \tau_{zx} = G\gamma_{zx}, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_x, \varepsilon_z$  – нормальные относительные деформации по осям  $x, z$ ;  $\gamma_{xz}, \gamma_{zx}$  – тангенциальные относительные деформации;  $E_1(T)$  – модуль Юнга для упругой деформации;  $E_2(T)$  и  $E_{2-}(T)$  – соответственно модуль Юнга для пластической деформации при растяжении и сжатии;  $\varepsilon_u(T)$  и  $\varepsilon_{u-}(T)$  – соответственно предел упругости при растяжении и сжатии;  $\varepsilon_{xp}, \varepsilon_{zp}$  и  $\varepsilon_{xp-}, \varepsilon_{zp-}$  – соответственно относительная пластическая деформация элемента при растяжении и сжатии по осям  $x, z$ ;  $G$  – модуль сдвига.

Накопление пластических деформаций при охлаждении и движение слитка (деформационная кривая стали, используемая в математической модели, представлена в работе [3]) производили по правилам:

$$\varepsilon'_{xp} = \max \left\{ \varepsilon_{xp}, (\varepsilon_x - \varepsilon_{xp-} - \varepsilon_u(T)) \left( 1 - \frac{E_2(T)}{E_1(T)} \right) \right\}, \quad (5)$$

$$\varepsilon'_{xp-} = \min \left\{ \varepsilon_{xp-}, (\varepsilon_x - \varepsilon_{xp} - \varepsilon_{u-}(T)) \left( 1 - \frac{E_{2-}(T)}{E_1(T)} \right) \right\}, \quad (6)$$

$$\varepsilon'_{zp} = \max \left\{ \varepsilon_{zp}, (\varepsilon_z - \varepsilon_{zp-} - \varepsilon_u(T)) \left( 1 - \frac{E_2(T)}{E_1(T)} \right) \right\}, \quad (7)$$

$$\varepsilon'_{zp-} = \min \left\{ \varepsilon_{zp-}, (\varepsilon_z - \varepsilon_{zp} - \varepsilon_{u-}(T)) \left( 1 - \frac{E_{2-}(T)}{E_1(T)} \right) \right\}, \quad (8)$$

где  $\varepsilon_{xp}, \varepsilon_{zp}, \varepsilon_{xp-}, \varepsilon_{zp-}$  – старые значения соответствующих пластических деформаций;  $\varepsilon'_{xp}, \varepsilon'_{zp}, \varepsilon'_{xp-}, \varepsilon'_{zp-}$  – новые значения соответствующих пластических деформаций.

Модель для расчета представляет собой сеть прямоугольных элементов с шагом  $\Delta x$  и  $\Delta z$ . Деформации материала в пространстве между центрами соседних элементов рассчитывали по формулам

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\Delta x + u(x + \Delta x, z) - u(x, z) - (1 + \alpha\theta)S_x(x, z)}{(1 + \alpha\theta)S_x(x, z)}, \\ \varepsilon_z &= \frac{\Delta z + w(x, z + \Delta z) - w(x, z) - (1 + \alpha\theta)S_z(x, z)}{(1 + \alpha\theta)S_z(x, z)}, \\ \gamma_{xz} &= \frac{w(x + \Delta x, z) - w(x, z) - T_x(x, z)}{\Delta x + u(x + \Delta x, z) - u(x, z)} + \frac{\varphi_y(x + \Delta x, z) + \varphi_y(x, z)}{2} - \Phi_x(x, z), \\ \gamma_{zx} &= \frac{u(x, z + \Delta z) - u(x, z) - T_z(x, z)}{\Delta z + w(x, z + \Delta z) - w(x, z)} + \frac{\varphi_y(x, z + \Delta z) + \varphi_y(x, z)}{2} - \Phi_z(x, z), \end{aligned} \quad (9)$$

где  $u, w$  – перемещения центра элемента по осям  $x, z$ ;  $\varphi_y$  – тангенс угла поворота центра элемента вокруг своей оси в плоскости  $XZ$ ;  $\theta = T(x, z) - T_{sol}$  – остаточная температура (разность между текущей температурой и температурой солидуса);  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения;  $S_x(x, z) = \Delta x + u(x + \Delta x, z) - u(x, z)$  – расстояние между центрами соседних элементов с координатами  $(x, z)$  и  $(x + \Delta x, z)$  в момент их кристаллизации;  $S_z(x, z) = \Delta z + w(x, z + \Delta z) - w(x, z)$  – расстояние между центрами соседних элементов с координатами  $(x, z)$  и  $(x, z + \Delta z)$  в момент их кристаллизации;  $T_x(x, z) = w(x + \Delta x, z) - w(x, z)$  – смещение центров соседних элементов с координатами  $(x, z)$  и  $(x + \Delta x, z)$  в момент их кристаллизации;  $T_z(x, z) = u(x, z + \Delta z) - u(x, z)$  – смещение центров соседних элементов с координатами  $(x, z)$  и  $(x, z + \Delta z)$  в момент их кристаллизации;  $\Phi_x(x, z) = (\varphi_y(x + \Delta x, z) - \varphi_y(x, z))/2$  – поворот соседних элементов с координатами  $(x, z)$  и  $(x + \Delta x, z)$  в момент их кристаллизации;  $\Phi_z(x, z) = (\varphi_y(x, z + \Delta z) - \varphi_y(x, z))/2$  – поворот соседних элементов с координатами  $(x, z)$  и  $(x, z + \Delta z)$  в момент их кристаллизации.

Исходную систему (9) решали для каждого элемента модели приближенно методом касательных относительно переменных  $u, w, \varphi_y$ , т. е. система была представлена в виде трех функций  $F_1, F_2, F_3$ , для

которых подбирались такие  $u$ ,  $w$ ,  $\varphi_y$ , чтобы  $F_1=0$ ,  $F_2=0$ ,  $F_3=0$ . Для этого вычисляли текущие значения  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ . Затем делали небольшое приращение  $\Delta u$ ,  $\Delta w$ ,  $\Delta \varphi_y$ , для которых также вычисляли  $F'_1$ ,  $F'_2$ ,  $F'_3$ . Тогда искомые приращения —  $\Delta u_i = F_1 \Delta u / (F'_1 - F_1)$ ,  $\Delta w_i = F_2 \Delta w / (F'_2 - F_2)$ ,  $\Delta \varphi_{y,i} = F_3 \Delta \varphi_y / (F'_3 - F_3)$ :

$$\begin{cases} \frac{\Delta \sigma_x}{\Delta x} + \frac{\Delta \tau_{xz}}{\Delta z} = F_1, \\ \frac{\Delta \tau_{zx}}{\Delta x} + \frac{\Delta \sigma_z}{\Delta z} = F_2, \\ \frac{\Delta \tau_{xz}}{\Delta z} - \frac{\Delta \tau_{zx}}{\Delta x} = F_3. \end{cases} \quad (10)$$

**Алгоритм расчета.** Моделирование деформации проводили одновременно с моделированием охлаждения расплава. Элементы модели, которые занимают пространство жидкой фазы металла, не участвуют в расчете деформаций и напряжений ( $u=0$ ,  $w=0$ ,  $\varphi_y=0$ ). В момент кристаллизации расплава в пространстве элемента происходит запоминание величин  $T_{sol}$ ,  $S_x$ ,  $S_z$ ,  $T_x$ ,  $T_z$ ,  $\Phi_x$ ,  $\Phi_z$  в качестве параметров элемента, которые в дальнейшем не изменяются. С этого момента в данном элементе параметры  $u$ ,  $w$  и  $\varphi_y$  начинают изменяться согласно приближенным решениям системы (9). Причем через каждый такт расчета температурного поля производится несколько тактов расчета поля перемещений  $u$ ,  $w$  и  $\varphi_y$ . Условие прекращения расчета поля перемещений —  $\Delta u < \xi$ ,  $\Delta w < \xi$ , где  $\xi$  — точность вычисления перемещений (в нашем случае принималась  $\xi=10^{-9}$  м). Из параметров  $u$ ,  $w$  и  $\varphi_y$  по формулам (2)–(9) вычисляли деформации и напряжения металла в данной области пространства.

**Результаты моделирования.** На основе исходных данных для стали Ст20 была построена трехмерная клеточная модель кристаллизации круглого слитка с различными диаметрами его сечений для МНЛЗ-3. Были приняты следующие размеры кристаллизатора и зон вторичного охлаждения: кристаллизатор — 0,8 м; ЗВО-1 — 0,294; ЗВО-2 — 0,596; ЗВО-3 — 1,658 м. Укрупненная схема процесса разлива стали для МНЛЗ-3, использованная в расчетах, приведена в работе [3]. В расчете учитывали положение роликов, коэффициенты теплоотдачи между воздухом и слитком, а также коэффициенты теплоотдачи на границе «кристаллизатор — поверхность расплава», «поверхность расплава — водяное охлаждение в ЗВО МНЛЗ». Для границ областей были математически определены граничные условия третьего рода. При моделировании использовали следующие коэффициенты теплоотдачи, которые были определены как оптимальные на предыдущем этапе исследования по длине жидкой фазы, корке в кристаллизаторе и температуре в области раскрытия:  $K_{кр}=1600$  Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $K_{31}=600$  Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $K_{32}=450$  Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $K_{33}=400$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) ( $K_{кр}$ ,  $K_{31}$ ,  $K_{32}$ ,  $K_{33}$  — коэффициенты теплоотдачи на поверхности слитка в кристаллизаторе и зонах вторичного охлаждения). При моделировании варьировали скоростью вытяжки по следующим уровням:  $v=0,8$ , 1,0, 1,2 м/с. В качестве температуры разлива использовали  $T=1550^\circ\text{C}$ . Объектом исследования был слиток диаметром заготовки  $d=160$  мм.

На рис. 1 показана зависимость поперечных напряжений круглого слитка диаметром 160 мм по его длине (5 мм от поверхности с внутренней стороны по отношению к изгибу) для разных скоростей вытяжки в МНЛЗ-3 при температуре заливки  $T=1550^\circ\text{C}$ , теплоотводе в кристаллизаторе  $K_{кр}=1600$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), в ЗВО-1 —  $K_{31}=600$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), в ЗВО-2 —  $K_{32}=450$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) и в ЗВО-3 —  $K_{33}=400$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). За начало отсчета длины слитка принят верхний уровень металла в кристаллизаторе. Причем отрицательная пространственная координата  $Y$  направлена по длине слитка. Как видно из рисунка, для всех скоростей разлива напряжения являются сжимающими. Причем наибольшей величины они достигают для скоростей разлива  $v=0,8$  м/мин, а наименьшей — для  $v=1,2$  м/мин. В интервале  $1 < l < 4$  м напряжения носят циклический характер, что связано с изменением коэффициентов теплоотдачи в зонах вторичного охлаждения МНЛЗ. Следует отметить, что анализ динамики напряжений показал, что изменения напряженного состояния симметрично по отношению к внутренней и внешней поверхностям слитка. Поэтому рассмотрение зависимостей напряжений по длине слитка проходило только по одной внешней поверхности.

На рис. 2 показана зависимость поперечных напряжений круглого слитка диаметром 160 мм по его длине (55 мм от поверхности) для разных скоростей вытяжки в МНЛЗ-3. Из рисунка виден рост растягивающих напряжений на участке  $3,5 < l < 14$  м для всех скоростей разлива. Причем при скорости разлива  $v=1,2$  м/мин уровень растягивающих напряжений минимален по сравнению с уровнем напряжений в слитке, разливаемом при скорости  $v=0,8$  и 1 м/мин. На уровне кристаллизатора практически все напряжения равны 0, так как на этом слое (55 мм от поверхности) внутри слитка находится жидкая фаза. Как и в предыдущем случае, на участке от кристаллизатора до точки разгиба минимальный уровень напряжений обеспечивается скоростью  $v=1,2$  м/мин.

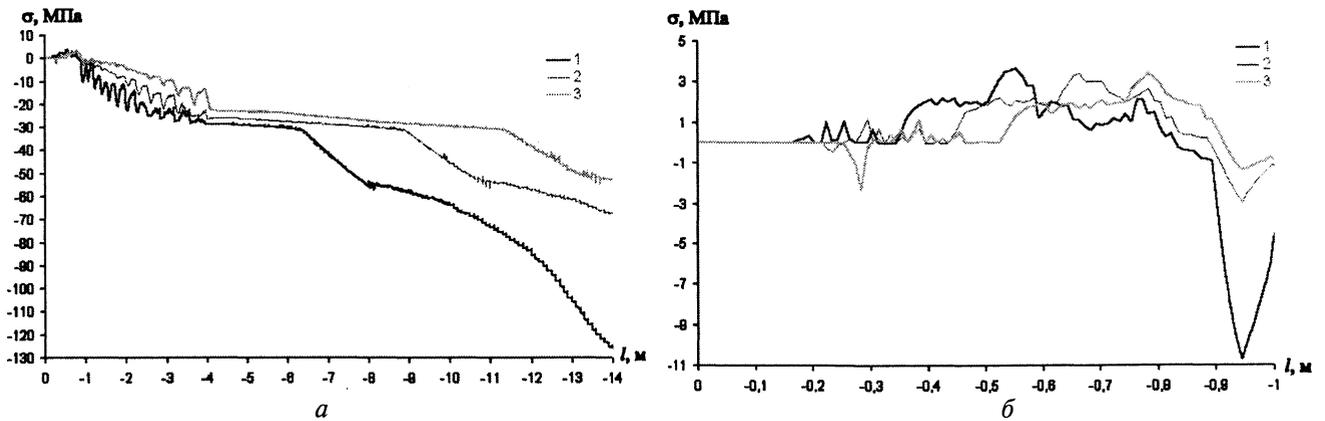


Рис. 1. Изменение величины поперечных напряжений круглого слитка диаметром 160 мм по его длине для разных скоростей вытяжки в МНЛЗ-3 ( $v = 0,8$  м/мин; 2 – 1; 3 – 1,2 м/мин) при температуре заливки  $T = 1550$  °С, теплоотводе в кристаллизаторе  $K_{кр} = 1600$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), в ЗВО-1 –  $K_{31} = 600$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), в ЗВО-2 –  $K_{32} = 450$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) и в ЗВО-3 –  $K_{33} = 400$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) на расстоянии 5 мм от поверхности с внутренней стороны по отношению к изгибу: а – по рассчитанной длине слитка; б – увеличенный фрагмент

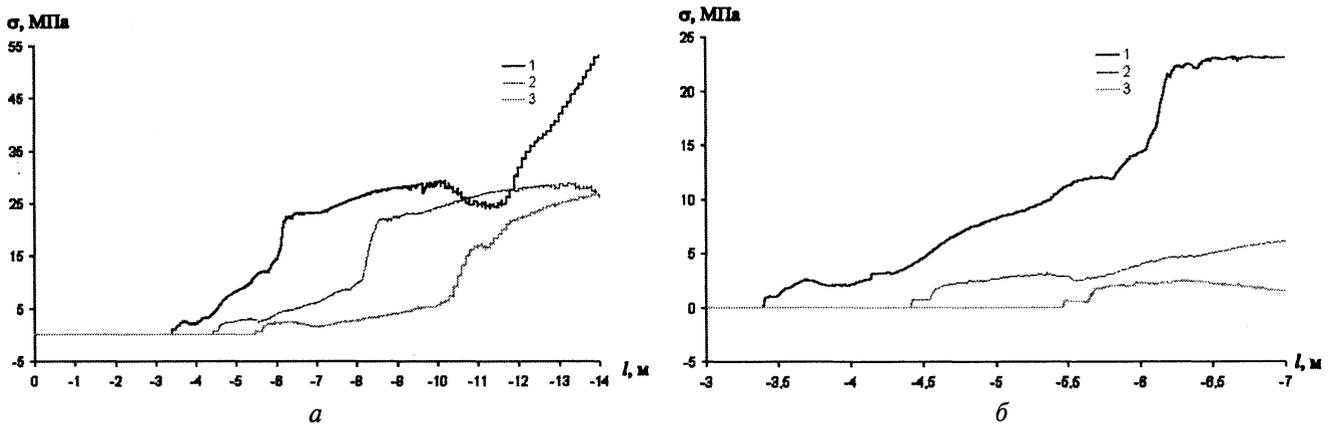


Рис. 2. Изменение величины поперечных напряжений круглого слитка диаметром 160 мм по его длине для разных скоростей вытяжки в МНЛЗ-3 ( $v = 0,8$  м/мин; 2 – 1; 3 – 1,2 м/мин) при температуре заливки  $T = 1550$  °С, теплоотводе в кристаллизаторе  $K_{кр} = 1600$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), в ЗВО-1 –  $K_{31} = 600$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), в ЗВО-2 –  $K_{32} = 450$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) и в ЗВО-3 –  $K_{33} = 400$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) на расстоянии 55 мм от поверхности с внутренней стороны по отношению к изгибу: а – по рассчитанной длине слитка; б – увеличенный фрагмент

На рис. 3 показана зависимость поперечных напряжений круглого слитка диаметром 240 мм (сталь Ст20) по его длине (на расстоянии 5 мм от поверхности) для разных скоростей вытяжки в МНЛЗ-3 при температуре заливки  $T = 1550$  °С, теплоотводе в кристаллизаторе  $K_{кр} = 1600$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), в ЗВО-1 –  $K_{31} = 600$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), в ЗВО-2 –  $K_{32} = 450$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) и в ЗВО-3 –  $K_{33} = 400$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Из рисунка видно, что на расстоянии 5 мм от поверхности на всех скоростях вытяжки в интервале от 2 до 14 м напряжения являются сжимающими. Причем наименьший уровень сжимающих напряжений наблюдается для скорости  $v = 1,2$  м/мин, а наибольший – для  $v = 0,8$  м/мин. В кристаллизаторе наибольший уровень растягивающих напряжений наблюдается для скорости  $v = 0,8$  м/мин, а наименьший – для  $v = 1,2$  м/мин.

На рис. 4 представлена зависимость поперечных напряжений круглого слитка диаметром 240 мм (сталь Ст20) по его длине для разных скоростей вытяжки в МНЛЗ-3, которые формируются на расстоянии 15 мм от поверхности. Как видно из рисунка, для скорости разливки  $v = 0,8$  м/мин наблюдаются наименьшие значения сжимающих напряжений, достигающие  $-48$  МПа. Увеличение скорости разливки приводит к сдвигу зависимости напряжений в сторону увеличения длины слитка. Наименьший уровень как сжимающих, так и растягивающих напряжений наблюдается для скорости  $v = 1,2$  м/мин. Увеличение растягивающих напряжений наибольшее для  $l < 2$  м при  $v = 0,8$  м/мин.

На рис. 5 показана зависимость поперечных напряжений круглого слитка диаметром 240 мм (сталь Ст20) по его длине для разных скоростей вытяжки в МНЛЗ-3, которые формируются на расстоянии 55 мм от поверхности. Как видно из рисунка, при движении внутрь слитка от кристаллизатора увеличиваются растягивающие напряжения. Причем наибольшему напряженному состоянию соответствуют скорости  $v = 0,8$  м/мин, наименьшему –  $v = 1,2$  м/мин. Сжимающих напряжений на этом слое слитка не наблюдается. Предельные растягивающие напряжения достигают величины 25 МПа для скорости разливки  $v = 0,8$  м/мин.

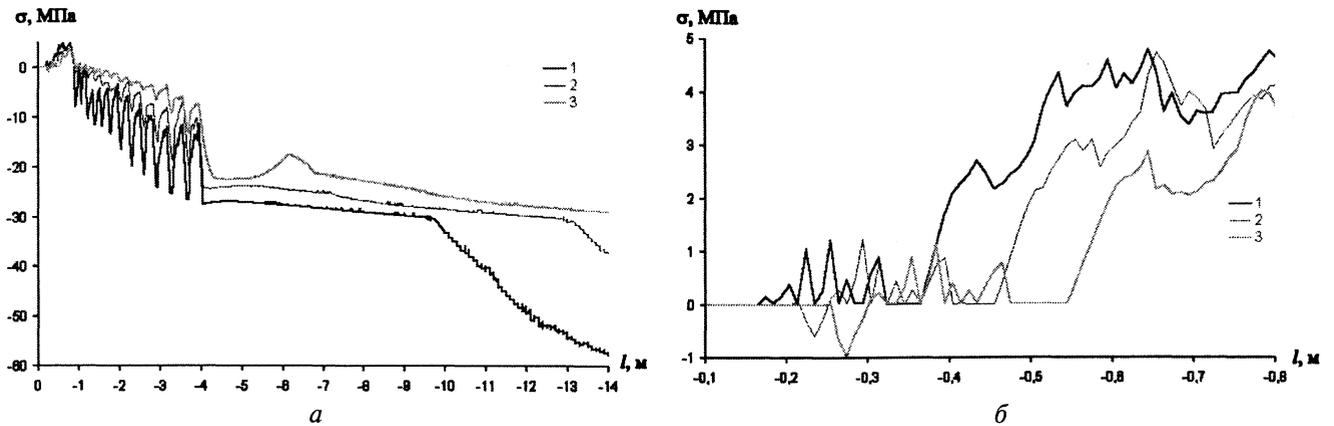


Рис. 3. Изменение величины поперечных напряжений круглого слитка диаметром 240 мм по его длине для разных скоростей вытяжки в МНЛЗ-3 ( $I = 0,8$  м/мин; 2 – 1; 3 – 1,2 м/мин) при температуре заливки  $T=1550$  °С, теплоотводе в кристаллизаторе  $K_{кр}=1600$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), в ЗВО-1 –  $K_{з1}=600$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), в ЗВО-2 –  $K_{з2}=450$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) и в ЗВО-3 –  $K_{з3}=400$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) на расстоянии 5 мм от поверхности с внутренней стороны по отношению к изгибу: а – по рассчитанной длине слитка; б – увеличенный фрагмент

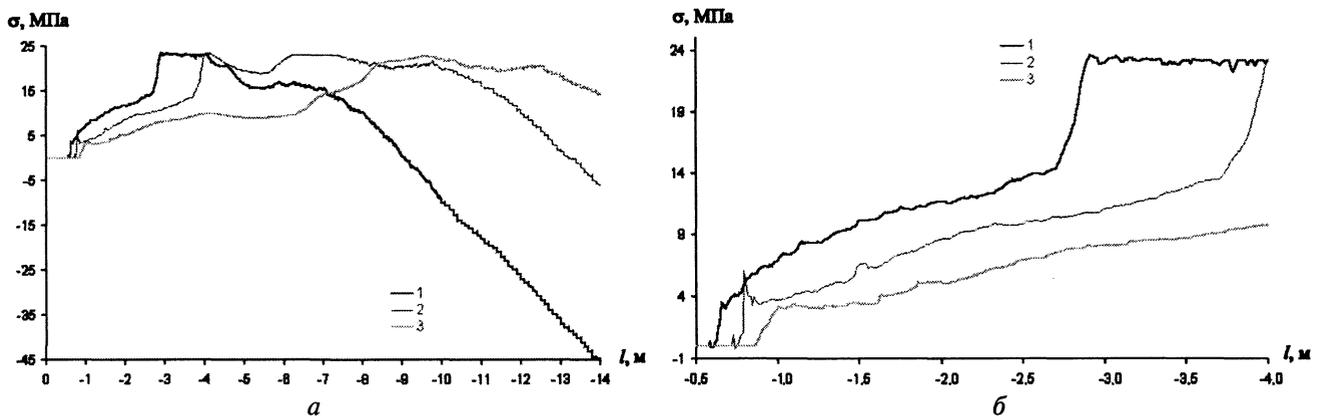


Рис. 4. Изменение величины поперечных напряжений круглого слитка диаметром 240 мм по его длине для разных скоростей вытяжки в МНЛЗ-3 ( $I = 0,8$  м/мин; 2 – 1; 3 – 1,2 м/мин) при температуре заливки  $T=1550$  °С, теплоотводе в кристаллизаторе  $K_{кр}=1600$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), в ЗВО-1 –  $K_{з1}=600$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), в ЗВО-2 –  $K_{з2}=450$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) и в ЗВО-3 –  $K_{з3}=400$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) на расстоянии 15 мм от поверхности с внутренней стороны по отношению к изгибу: а – по рассчитанной длине слитка; б – увеличенный фрагмент

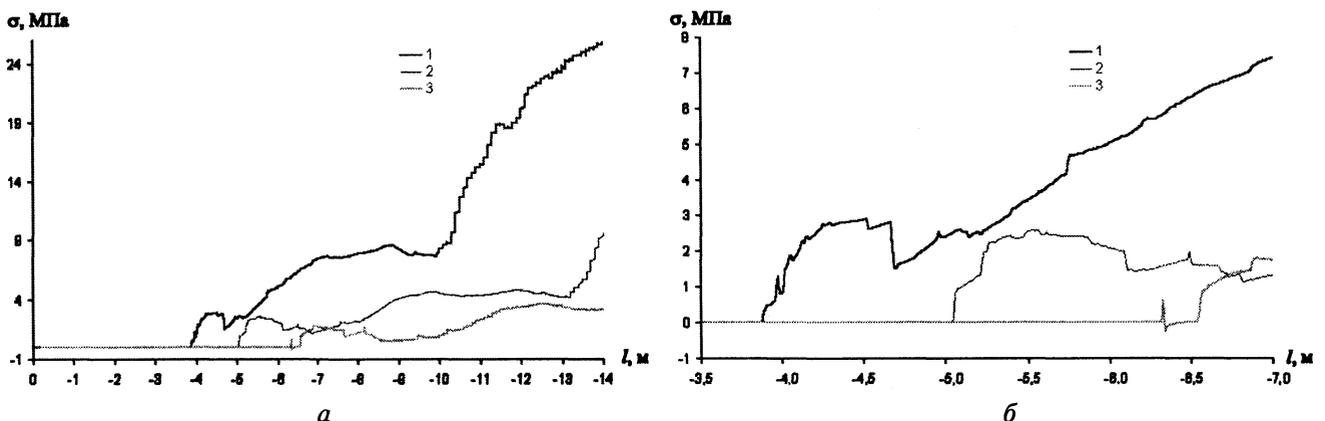


Рис. 5. Изменение величины поперечных напряжений круглого слитка диаметром 240 мм по его длине для разных скоростей вытяжки в МНЛЗ-3 ( $I = 0,8$  м/мин; 2 – 1; 3 – 1,2 м/мин) при температуре заливки  $T=1550$  °С, теплоотводе в кристаллизаторе  $K_{кр}=1600$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), в ЗВО-1 –  $K_{з1}=600$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), в ЗВО-2 –  $K_{з2}=450$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) и в ЗВО-3 –  $K_{з3}=400$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) на расстоянии 55 мм от поверхности с внутренней стороны по отношению к изгибу: а – по рассчитанной длине слитка; б – увеличенный фрагмент

### Литература

1. Мирсалимов В.М., Емельянов В.А. Напряженное состояние и качество непрерывного слитка. М.: Металлургия, 1990.
2. Сладкоштьев В.Т., Потанин Р.В., Суладзе О.Н., Рутес В.С. Непрерывная разливка стали на радиальных установках. М.: Металлургия, 1974.

3. Чичко А.Н., Маточкин В.А., Кукуй Д.М., Муриков М.А., Демин А.В. Моделирование упругопластических деформаций при разливке стали в слитки круглого сечения // Литье и металлургия. 2006. № 2. Ч.1. С. 35–38.

4. Чичко А.Н., Кукуй Д.М., Андрианов Н.В., Яцкевич Ю.В., Чичко О.И. Моделирование влияния охлаждаемых и неохлаждаемых роликов на температуры и напряжения поверхности промышленного слитка в зоне вторичного охлаждения // Литье и металлургия. 2003. №3. С. 131–138.

5. Чичко А.Н., Бороздин А.С. Трехмерное моделирование напряженного состояния движущегося слитка при изменении граничных условий по температуре // Изв. вузов. Энергетика. 2005. №4. С. 61–67.

6. Чичко А.Н., Яцкевич Ю.В., Соболев В.Ф., Чичко О.И. Компьютерное моделирование в задачах термоупругости сложных пространственных деталей // Изв. вузов. Энергетика. 2003. № 3. С. 68–74.



## Металл-Форум Украина-2006

**Форум-2006 – четвертая ежегодная встреча металлопроизводителей, машиностроителей, трейдеров и потребителей металла.**

Форум состоится 19–21 октября 2006 г. в Выставочном центре "КиевЭкспоПлаза" (ст. метро "Нивки", ул. Салютная, 2Б).

В рамках Форума пройдут:

- 4-я специализированная металлургическая выставка;
- 5-я конференция "Металл-2006: управление, производство, торговля и потребление";
- специальная экспозиция изделий художественнойковки и литья, а также аукцион по их продаже;
- второй всеукраинский конкурс "Металл-Прогресс";
- дополнительные деловые мероприятия (круглые столы, мастер-классы, презентации компаний).

### КРАТКО ОБ УСЛОВИЯХ УЧАСТИЯ:

#### ВЫСТАВКА:

- Оборудованная выставочная площадь (у.е./1 кв.м) – 240.
- Необорудованная площадь (у.е./1 кв.м) – 217.
- Открытая площадь (у.е./1 кв.м) – 50.

Организационный взнос – 190 у.е. (обязательный).

Минимальный выставочный стенд – 6 кв.м.

#### СКИДКИ, БОНУСЫ:

- Экспонентам – участие 1-го представителя в конференции – бесплатно при выставочной площади свыше 10 кв.м;
- Участникам конференции – скидка 10% при оформлении участия двух и более человек.

Более детальная информация находится на сайте: <http://www.metal-forum.com.ua>.