

УДК 621.746

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУР, ТЕРМОВЯЗКОУПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ В КОРКЕ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ

Доктора техн. наук, профессора САМОЙЛОВИЧ Ю. А., ТИМОШПОЛЬСКИЙ В. И.,
канд. техн. наук ТРУСОВА И. А., инж. МАТОЧКИН В. А.

*Белорусский национальный технический университет,
РУП «Белорусский металлургический завод»*

Обоснование и выбор рациональных теплотехнологических режимов при получении непрерывнолитых заготовок, обеспечивающих повышение качества металла, должны базироваться на комплексном решении задач нестационарного теплообмена и определения термических напряжений и деформаций. В области моделирования собственно термонапряжений и термдеформаций при процессах затвердевания в настоящее время не существует единого устоявшегося подхода. Так, в ряде работ используется упрощенный математический аппарат строительной механики [1, 2] или теории упругости [3]. Стремясь к упрощению выкладок, авторы отмеченных работ пренебрегают эффектами вязкой деформации материала и зависимостью упругих характеристик (модуля упругости) от температуры. Между тем, одной из наиболее существенных особенностей поведения материала затвердевающих стальных заготовок является высокая склонность к высокотемпературной ползучести в диапазоне температур от 900...1000 до 1500 °С. В [4, 5] доказано, что построение деформационной модели затвердевания стальных слитков и заготовок должно базироваться на представлении о термовязкоупругом поведении материала.

Известно, что напряженно-деформированное состояние определяется нестационарным температурным полем. Созданы и получили широкое распространение надежные математические модели для расчетов процессов нестационарного теплообмена при затвердевании слитков и заготовок, обеспечивающих прогноз температурных полей с достаточной для практики точностью (например, [5, 6]).

Ниже приведена постановка задачи определения термических напряжений в затвердевающей стальной заготовке цилиндрической формы при использовании динамических уравнений термовязкоупругости и с учетом зависимости упругих и реологических характеристик стали от температуры.

Для расчета тепловых процессов использована математическая модель теплообмена для заготовки цилиндрической формы радиусом R при допущении об осевой симметрии температурного поля [6]:

$$\rho(T)c_{\text{эф}}(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[\lambda(T)r\frac{\partial T}{\partial r}\right]; \quad (1)$$

$$T(r,0) = f(r) \quad \text{при } t = 0; \quad (2)$$

$$-\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r}\Big|_{r=R} = \alpha(T_{\text{пов}} - T_s) + C(T_{\text{пов}}^4 - T_s^4) \quad \text{при } r = R; \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r}\Big|_{r=0} \quad \text{при } r = 0, \quad (4)$$

где

$$c_{\text{эф}}(T) = c(T_{\text{сол}}) - L\frac{d\psi}{dt}, \quad (5)$$

L – теплота кристаллизации стали (272 кДж/кг); $\partial\psi/\partial T$ – темп кристаллизации, определяемый на основе диаграммы состояния сплава с привлечением гипотезы квазиравновесия; остальные обозначения – общепринятые в задачах теплопроводности.

При постановке задачи об определении напряжений и деформаций в за твердевающей заготовке за основу приняли динамические уравнения вязкоупругости [8–10]:

$$\left. \begin{aligned} 2G\dot{\epsilon}_r &= \dot{S}_r + \frac{1}{\tau_p}S_r; \\ 2G\dot{\epsilon}_\theta &= \dot{S}_\theta + \frac{1}{\tau_p}S_\theta; \\ 2G\dot{\epsilon}_z &= \dot{S}_z + \frac{1}{\tau_p}S_z, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

дополняемые уравнением равновесия

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (7)$$

и уравнением взаимосвязи средних значений компонент тензоров деформаций и напряжений

$$\epsilon = N\sigma + \alpha\delta T. \quad (8)$$

Здесь принято, что $e_r, e_\theta, e_z, S_r, S_\theta, S_z$ – компоненты девиаторов деформаций и напряжений:

$$e_r = \varepsilon_r - \varepsilon; \quad e_\theta = \varepsilon_\theta - \varepsilon; \quad e_z = \varepsilon_z - \varepsilon;$$

$$S_r = \sigma_r - \sigma; \quad S_\theta = \sigma_\theta - \sigma; \quad S_z = \sigma_z - \sigma;$$

G – модуль сдвига; τ_p – условное время релаксации материала,

$$\tau_p = \left(\frac{G}{\eta} - \frac{G'\dot{T}}{G} \right)^{-1}; \quad (9)$$

$$N = (1 - \nu)/E,$$

δT – избыточная локальная температура; ε и σ – средние значения деформаций и напряжений; η – коэффициент вязкости, определяющий реологические свойства материала; точка над символом означает дифференцирование по времени t .

Условие совместности деформаций позволяет получить следующие выражения двух основных компонент тензора деформаций:

$$\varepsilon_r = 3(N\sigma + \alpha\delta T) - \frac{3}{r^2} \int_0^r (N\sigma + \alpha\delta T) r dr - \frac{\varepsilon_z}{2}; \quad (10)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{3}{r^2} \int_0^r (N\sigma + \alpha\delta T) r dr - \frac{\varepsilon_z}{2}. \quad (11)$$

Уравнения динамики деформаций (5) интегрируются с учетом граничных условий:

$$\sigma_r = 0 \text{ при } r = R; \quad \varepsilon_r = 0 \text{ при } r = 0 \quad (12)$$

и зависимости механических характеристик материала (G , τ_p) от температуры [11, 12]. При этом значения локальной избыточной температуры определяются из решения системы уравнений нестационарной теплопроводности (1)–(5).

В качестве примера произведем расчет процесса затвердевания и возникающих термических напряжений в цилиндрической заготовке диаметром 0,309 м (сталь 80К). Исходные данные: $T_{лик} = 1458$ °С; $T_{сол} = 1381$ °С; $c = 0,69$ кДж/(кг · К), в интервале температур кристаллизации теплоемкость определяется по (5); массовая плотность изменяется от 7550 до 6900 кг/м³ при повышении температуры от 20 до 1550 °С, коэффициент теплопроводности стали монотонно изменяется от 29,1 до 23,26 Вт/(м · К) в том же

диапазоне температур. Затвердевающая заготовка проходит через три зоны, различающиеся интенсивностью внешнего охлаждения: зону плотного контакта заготовки и кристаллизатора ($\alpha = 2093,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$), зону газозвушного зазора в кристаллизаторе ($\alpha = 34,89 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$), зону вторичного водовоздушного охлаждения ($\alpha = 290,75 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$).

На рис. 1 показано изменение температур в характерных точках сечения непрерывнолитой заготовки и расположение изотерм ликвидуса, границы «выливаемости» и солидуса, полученные расчетным путем. Из рис. 1 очевидно, что время затвердевания цилиндрической заготовки диаметром 0,309 м составляет 22...23 мин.

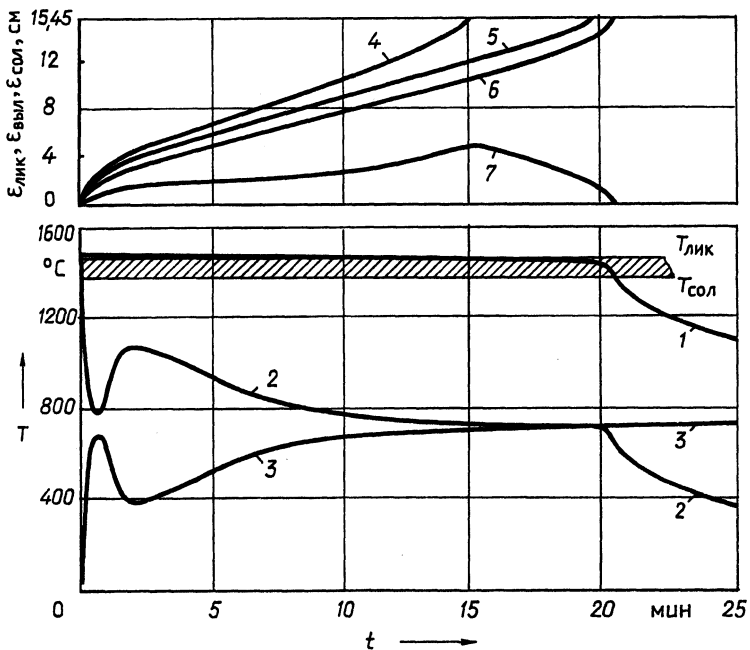


Рис. 1. Изменение во времени температур на оси (1) и поверхности (2) заготовки диаметром 30,9 см (сталь 80К), максимальной разности температур вдоль радиуса $\Delta T = T_{оси} - T_{пов}$ (3), изотерм ликвидуса (4), границы выливаемости (5), солидуса (6) и ширины двухфазной зоны $\Delta \epsilon = \epsilon_{лик} - \epsilon_{сол}$ (7)

Решение задачи термовязкоупругости (6)–(12) выполнено с использованием локальных значений температуры и скорости охлаждения, полученных в ходе решения задачи теплопроводности. Результаты решения представлены на рис. 2 в виде распределения радиальной σ_r и тангенциальной σ_θ компонент тензора напряжений для нескольких последовательных моментов времени.

Для продольной компоненты тензора напряжений, как показано в работе [8], с достаточной степенью точности соблюдается соотношение

$$\sigma_z = \sigma_r + \sigma_\theta.$$

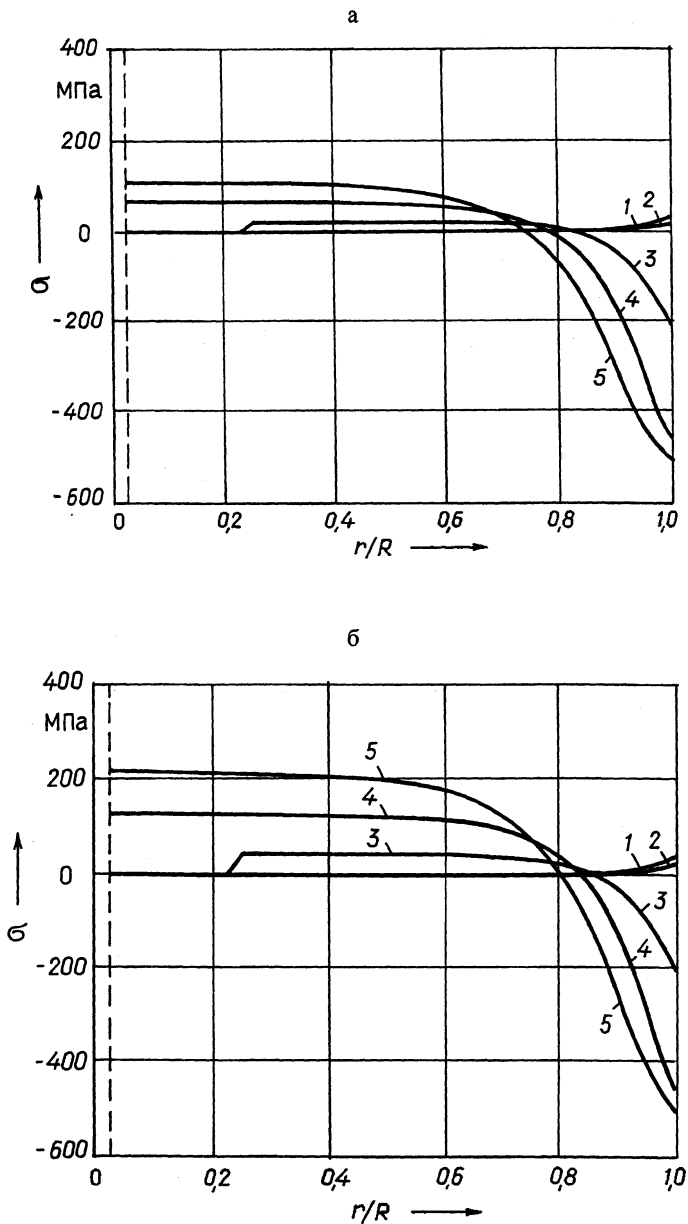


Рис. 2. Распределение компонент тензора напряжений вдоль радиуса заготовки для моментов времени: а – радиальной; б – касательной; $t = 5$ мин (1), 10 (2), 15 (3), 20 (4) и 25 мин (5)

Разработанная модель позволяет детально исследовать динамику поля температур, напряжений и деформаций для начальной стадии формирования отливки в пределах кристаллизатора (рис. 3). Примем, что протяженность зоны плотного контакта заготовки со стенкой кристаллизатора равна 0,2 м, а последующего газовойздушного зазора в кристаллизаторе – 0,8 м. Далее заготовка попадает в зону форсуночного охлаждения (0,2 м), после чего теплообмен на ее поверхности осуществляется путем теплообмена излучением и конвекцией с окружающим воздухом. Скорость разлива-

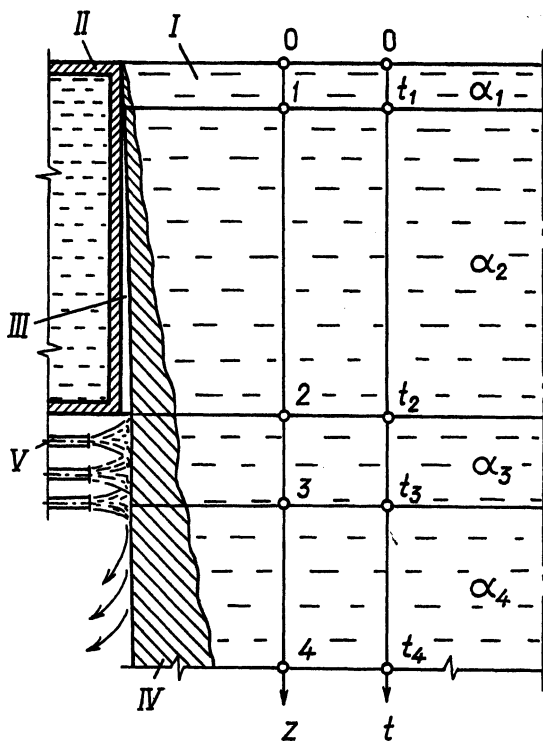


Рис. 3. Расположение расчетных зон в пределах кристаллизатора и первой зоны форсуночного охлаждения: I – расплав металла; II – стенка кристаллизатора; III – газоздушный зазор; IV – твердая корка литой заготовки; V – форсунки водяного охлаждения

ки – 0,6 м/мин, марка стали – 80К. Для указанных четырех зон приняты следующие значения коэффициентов теплоотдачи: 2093,4 Вт/(м² · К) (зона 1), 58,15 (зона 2), 872,2 (зона 3) и 23,26 Вт/(м² · К) (зона 4). Изменение основных параметров процесса затвердевания непрерывнолитой заготовки на начальной стадии ее формирования приведено на рис. 4. Результаты решения соответствующей задачи термовязкоупругости представлены на рис. 5а. Здесь точками выделена зона допустимых деформаций заготовки (0,25...0,5 %), а кружками – изменение предела прочности стали в зависимости от температуры поверхности, график изменения которой во времени показан на рис. 4.

Из рассмотрения графиков на рис. 5а можно сделать вывод о том, что при заданных теплофизических и механических характеристиках стали и условиях внешнего теплообмена на поверхности заготовки в начальный период затвердевания возникают растягивающие деформации и напряжения, превышающие некоторые предельные значения, установленные эмпирическим путем, что создает предпосылки для возникновения горячих

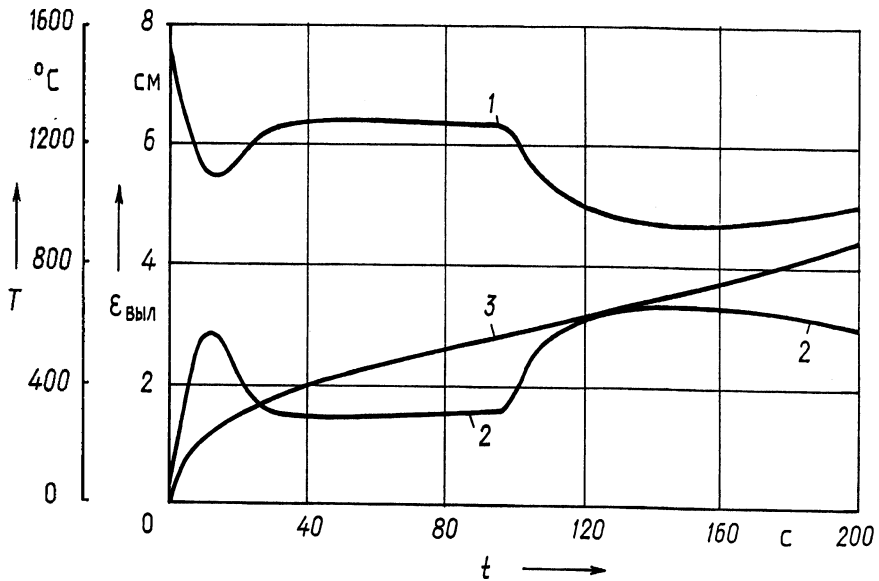
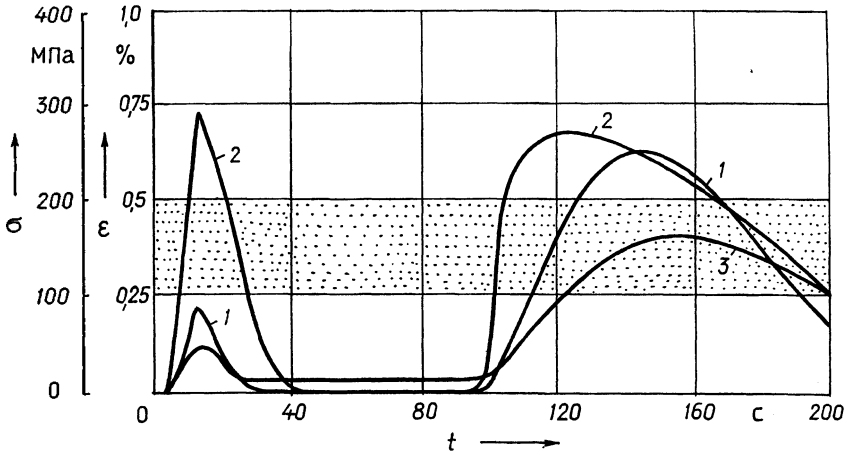


Рис. 4. Изменение во времени параметров заготовки диаметром 30,9 см: сталь 80К; 1 – температуры поверхности; 2 – разности температур вдоль радиуса $\Delta T = T_{\text{оси}} - T_{\text{пов}}$; 3 – толщины твердой корки, определяемой по изотерме выливаемости ($T_{\text{выл}} = 1450,3 \text{ }^\circ\text{C}$), для условий охлаждения при $\lambda_p = 25,59 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$

трещин в твердой корке. С целью снижения уровня возникающих растягивающих напряжений можно рассмотреть использование электромагнитного перемешивания расплава в пределах кристаллизатора. В [13] на основании экспериментов по термометрированию непрерывнолитой заготовки при электромагнитном перемешивании высказано предположение о том, что ускоренное движение расплава вдоль фронта кристаллизации сопровождается снижением перепада температур в твердой корке, что должно привести к снижению возникающих в ней термических напряжений. Используя при решении задачи теплопроводности завышенные значения коэффициента теплопроводности расплава λ_p , можно исследовать влияние усиленной теплопередачи от расплава к твердой корке на величину возникающих в ней напряжений и деформаций. На рис. 5б показано, что введение в расчет значения коэффициента $\lambda_p = 87,23 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ (вместо $25,59 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ при отсутствии движения расплава) приводит к почти полному подавлению перепада температур, а также и растягивающих напряжений и деформаций в начальный период затвердевания отливки (10...20 с от начала процесса). Вместе с тем, воздействие перемешивания расплава должно оказать, судя по результатам расчета, положительное влияние на состояние твердой корки и в зоне водяного форсуночного охлаждения, где величина растягивающих напряжений оказалась меньше, чем соответствующие локальные значения предела прочности стали.

а



б

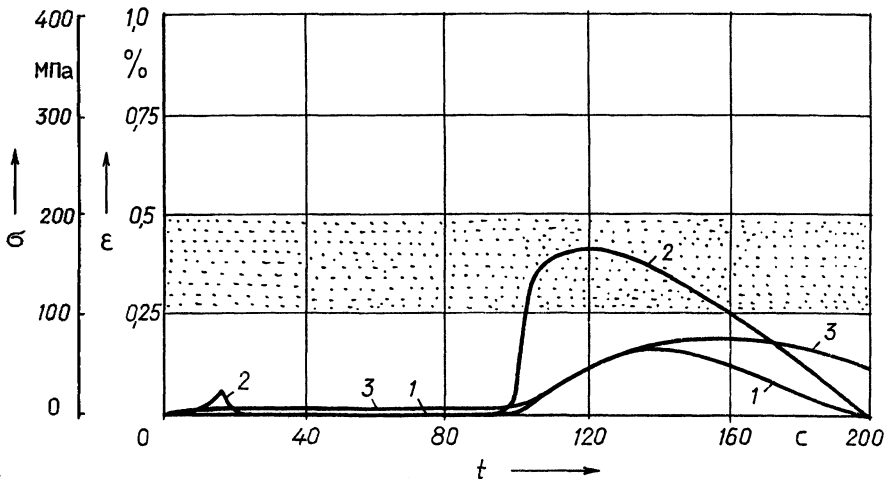


Рис. 5. Изменение во времени касательных напряжений (1) и деформаций (2) на поверхности заготовки диаметром 30,9 см (сталь 80К), а также предела прочности стали (3) при температуре на поверхности для условий охлаждения: а – при $\lambda_p = 25,59$ Вт/(м · К); б – при $\lambda_p = 87,23$ Вт/(м · К)

ВЫВОД

Изложен способ решения связанной системы уравнений нестационарного теплообмена и термовязкоупругости для затвердевающей стальной заготовки при непрерывном литье. На примере анализа начальной стадии затвердевания отливки показана возможность использования предложенной математической модели для разработки мероприятий по организации рациональных режимов охлаждения непрерывнолитой заготовки, способствующих снижению уровня термических напряжений и деформаций, т. е. и вероятности возникновения дефектов типа горячих трещин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скворцов А. А. О формировании плоского непрерывного стального слитка и возникновении на нем поверхностных дефектов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1961. – № 7. – С. 78–87.
2. Рутес В. С., Аскольдов В. И. О деформации затвердевающего непрерывного слитка в зоне вторичного охлаждения // Изв. АН СССР. Металлы. – 1968. – № 3. – С. 113–117.
3. Никитенко Н. И., Евтеев Д. П. и др. Об оптимальных условиях охлаждения слитка при динамическом режиме работы установок непрерывной разливки стали // Изв. АН СССР. Металлы. – 1978. – № 1. – С. 106–113.
4. Дымова Л. Г., Севастьянов П. В., Тимошпольский В. И. Сравнительный анализ математических моделей формирования термических напряжений и деформаций в затвердевающем слитке // ИФЖ. – Т. 60, № 1. – С. 115–120.
5. Стальной слиток: В 3 т. / Ю. А. Самойлович, В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова, В. В. Филиппов. – Т. 2: Затвердевание и охлаждение / Под общ. ред. В. И. Тимошпольского, Ю. А. Самойловича. – Мн.: Белорусская наука, 2000. – 637 с.
6. Самойлович Ю. А. Формирование слитка. – М.: Металлургия, 1977. – 158 с.
7. Тепловые процессы при непрерывном литье стали / Ю. А. Самойлович, С. А. Крулевецкий, В. А. Горяинов, З. К. Кабаков. – М.: Металлургия, 1982. – 152 с.
8. Самойлович Ю. А., Ушакова Р. Г. Термические напряжения в стальном слитке, остывающем в изложнице // Теплофизика и теплотехника в металлургии: Сб. тр. ВНИИМТ. – Свердловск, 1969. – № 19. – С. 199–211.
9. Самойлович Ю. А., Кабаков З. К. Учет эффекта релаксации при определении термических напряжений в отливке, затвердевающей в интервале температур // Горение, теплообмен и нагрев металла: Сб. тр. ВНИИМТ. – 1973. – № 24. – С. 100–113.
10. Самойлович Ю. А. Микрокомпьютер в решении задач кристаллизации слитка. – М.: Металлургия, 1988. – 181 с.
11. Дергунов И. Д. Определение периода релаксации углеродистых сталей и цветных металлов // ЖТФ. – 1951. – Т. 21. Вып. 12. – С. 1526–1534.
12. Пюрингер О. М. Формирование непрерывнолитой заготовки на МНЛЗ // Черные металлы / Пер. с нем. – 1976. – № 6. – С. 3–11.
13. Влияние электромагнитного перемешивания на температурное поле стальной заготовки при непрерывном литье / Ю. А. Самойлович, В. И. Тимошпольский, Г. А. Анисович, И. А. Трусова // Весці НАНБ. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2001. – № 1. – С. 141–143.

Представлена

НТС УНПО «БНТУ–БМЗ»

Поступила 25.02.2002