

УДК 669.18.147:621.746.047

Гресс А. В.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ
В КРИСТАЛЛИЗУЮЩЕЙСЯ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКЕ**

Одним из факторов, определяющих появление трещин, являются термомеханические напряжения (далее термонапряжения), возникающие при формировании слитка. Поскольку в настоящее время не существует достаточно точных и эффективных способов экспериментального определения термических напряжений в процессе кристаллизации и охлаждения отливки, в решении этой проблемы, наряду с экспериментальными работами, большое значение имеет математическое моделирование тепловых и термомеханических явлений, происходящих в слитке при его затвердевании. Применение численных методов к анализу термомеханических процессов крайне затруднено [1]. Во всех таких методах необходимость учета «истории деформирования» твердой оболочки слитка обязательно накладывает отпечаток на математический аппарат, используемый при анализе деформаций и напряжений.

При моделировании термонапряженного состояния слитка допускали: 1) деформации и напряжения изменяются только вдоль нормали к поверхности оболочки; 2) максимальные напряжения имеют место вдоль нормали к поверхности грани слитка; 3) причиной возникновения термонапряжений является изменение температурного поля; 4) каждая расчетная область является внутренне уравновешенной; 5) тепловой эффект при деформировании тела пренебрежимо мал. Такие допущения позволяют решать задачу температурного и напряженного состояния по отдельности.

Расчет поля температур и координат фронта кристаллизации производился в двухмерной постановке по поперечному сечению непрерывнолитой блюмовой заготовки в приближении модифицированной нами [2] теории квазиравновесной двухфазной зоны. Задача решалась с использованием метода конечных разностей с расщеплением по направлениям. Определение гидродинамической обстановки в пределах кристаллизатора машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) производили с использованием данных, приведенных в [3, 4]. Такой подход позволил решить совместную задачу теплового и концентрационного состояния затвердевающей заготовки. Задачу напряженного состояния решали с помощью метода, изложенного в работе [5].

Целью работы являлось решение тепловой задачи о продвижении фронта кристаллизации и нахождение поля температур, а также анализ напряженного состояния затвердевшей корки при изменении температуры.

Согласно методике анализа напряженного состояния кристаллизующегося блюма, предложенной в [5], уравнение термопластичности имеет вид:

$$\dot{\varphi} + \frac{1 + \mu}{3\tau_p(1 - \mu)}\varphi = \frac{\alpha E}{1 - \mu}(\dot{\eta} - \dot{\delta}), \quad (1)$$

где μ – коэффициент Пуассона; α – коэффициент термического расширения; E – модуль упругости; τ_p – время релаксации напряжений; $\dot{\delta}t = t - t_{ног}$ – избыточная температура; $\varphi(x, \tau) = \sigma_{yy} = \sigma_{xx}$, σ – напряжения; $\alpha\dot{\eta} = \dot{\epsilon}_{yy} = \dot{\epsilon}_{xx}$ – скорость изменения деформаций; $\dot{\epsilon}_{yy}$, $\dot{\epsilon}_{xx}$ – компоненты тензора деформаций; точка над переменными означает операцию дифференцирования по времени.

Для определения параметра $\alpha\dot{\eta}$ используется условие равновесия оболочки:

$$\int_0^l \dot{\phi}(x, \tau) dx = 0. \quad (2)$$

Краевые условия:

$$\sigma_x|_{x=l} = 0; u|_{l=0} = 0; \sigma_x|_{\tau=0} = 0, \quad (3)$$

где u – перемещения; l – толщина твердой фазы.

При исследованиях термомеханических напряжений предполагали, что в исследуемом диапазоне температур и концентраций химических элементов модуль упругости (МПа) изменяется по зависимости [6]:

$$E_{ij} = 30825 + 4292,4[C_{ij}] - 14400[C_{ij}]^2 + 2052,5[S_{ij}] - 528[Mn_{ij}] - 1200[P_{ij}] + 17400[S_{ij}] - 22,56t_{ij} + 1,38 \cdot 10^{-3}t_{ij}^2, \quad (4)$$

где здесь и далее индексы ij означают номер контрольной ячейки.

Зависимость коэффициента Пуассона от температуры в диапазоне 1000–1450 °С найдена посредством статистической обработки табличных данных [7]:

$$\mu_{Pij} = 0,0105 + 3 \cdot 10^{-4}t_{ij}, R = 0,97; R_2 = 0,96; F(1,4) = 130. \quad (5)$$

Зависимость времени релаксации (τ_p) от температуры и напряжений (σ_n) находилась нами посредством оцифровки графиков [8] и последующей их статистической обработки:

$$\tau_{pij} = 27,638 - 0,018t_{ij} - 0,018\sigma_{ij}^H - 0,74 \ln \sigma_{ij}^H; R = 0,98; R_2 = 0,96; F(3,41) = 303. \quad (6)$$

Коэффициент линейной усадки также считался функцией температуры [9]:

$$\alpha_{ij} = 0,115 \cdot 10^{-4} + 10^{-8}t_{ij}. \quad (7)$$

Предельные напряжения рассчитывали согласно [8]:

$$\sigma_{ij}^H = 409,3 + 6,53[C_{ij}] - 77,42[C_{ij}]^2 - 9[S_{ij}] + 1,76[Mn_{ij}] - 78,28[P_{ij}] - 12,84[S_{ij}] - 0,264t_{ij} + 1,76 \cdot 10^{-6}t_{ij}^2. \quad (8)$$

Объектом исследований являлся процесс формирования блюмовой непрерывнолитой заготовки на МНЛЗ ДМК. Моделировали разливку Ст 20 в заготовку сечением 335 × 400 мм, вытягиваемой со скоростью 0,6 м/мин.

На рис. 1 приведено изменение расчетных напряжений в корке заготовки по истечении различного времени затвердевания. Установлено, что на начальном этапе кристаллизации на поверхности заготовки возникают растягивающие, а в глубинных слоях корки – сжимающие напряжения. В последующем растягивающие напряжения смещаются к центру заготовки и на его поверхности развиваются сжимающие напряжения.

На рис. 2 приведена динамика максимальных относительных растягивающих напряжений в корке заготовки, проходящей по кристаллизатору МНЛЗ. Очевидно, что такие напряжения возникают на 15–20 с времени процесса кристаллизации. Затем они несколько снижаются в зоне затухания гидродинамических потоков металла и вновь возрастают на выходе из кристаллизатора ввиду превышения расходов охлаждающих агентов над рациональными.

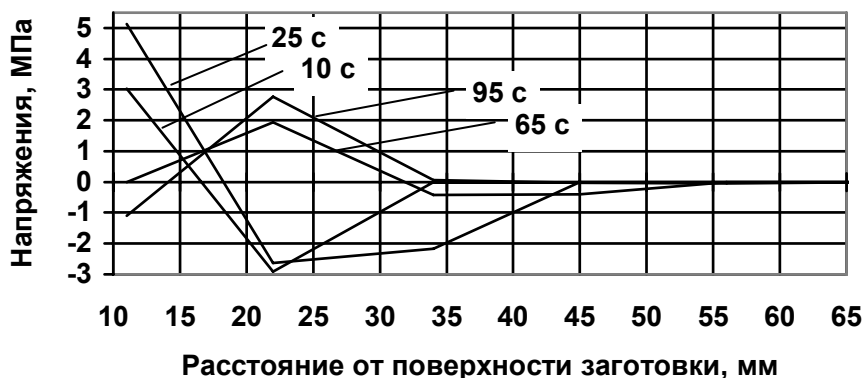


Рис. 1. Распределение напряжений по толщине корки в процессе кристаллизации заготовки

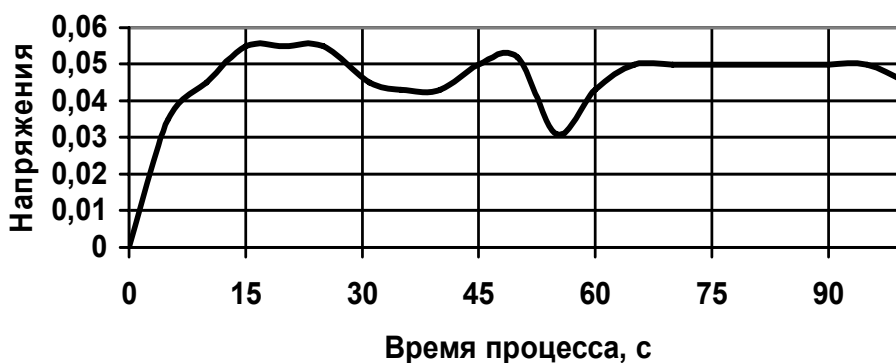


Рис. 2. Динамика напряжений на начальном этапе кристаллизации

При расчетах напряжений, связанных с воздействием ферростатического давления на кристаллизующую заготовку, допустимо пренебречь влиянием боковых граней заготовки, находящейся между роликами. В этом случае можно принять расчетную схему напряжений как для прямолинейного бруса заданной ширины с заземленными концами.

Нормальное напряжение в произвольной точке i поперечного сечения бруса описывается уравнением:

$$\sigma_{\phi}^n = \frac{M_x}{J_x} \delta, \tag{9}$$

где δ – расстояние от нейтральной оси до точки, в которой вычисляется нормальное напряжение; M_x – изгибающий момент, возникающий в рассматриваемом сечении; J_x – момент инерции сечения относительно нейтральной оси.

Положение нейтральной оси можно найти так:

$$\delta_n = \frac{\int_{-e}^e E(x) x dx}{\int_{-e}^e E(x) dx}. \tag{10}$$

Пользуясь элементарными понятиями теоретической механики, несложно определить, что в нашем случае:

$$J_x = \frac{h_\delta \varepsilon^3}{12}; \quad (11)$$

$$M_x = \rho_{жс} g H_{жс} l_\tau, \quad (12)$$

где h_δ – ширина бруса; l_τ – расстояние от выбранного сечения до заделки.

После подстановки уравнений (10)–(12) в уравнение (9) получим, что в любой точке расчетного поперечного сечения заготовки:

$$\sigma^n = 12 \frac{\delta \rho_{жс} H_{жс} g l_\tau}{h_\delta \varepsilon^3}. \quad (13)$$

Продифференцировав по времени уравнение (13) и добавив полученное выражение в правую часть уравнения (1), можем рассчитать величины $\varphi(x, \tau) = \sigma_{yy} = \sigma_{xx}$ с учетом температурного фактора и ферростатического давления.

Приведенная модель расчета термонапряженного состояния формирующейся непрерывнолитой заготовки была адаптирована в разработанную нами компьютерную модель ликвации примесей и мониторинга теплового состояния непрерывного слитка [2].

Результаты исследований, в целом, позволяют утверждать, что распределение напряжений при учете температурного фактора, фактора ферростатического давления и расстановки роликов на технологической оси носит чрезвычайно сложный характер и не может быть однозначно описано строгой аналитической зависимостью. Причина – зависимость напряжений не только от типоразмера заготовки, скорости вытягивания, режима охлаждения, расстановки роликов и т. п., но и от распределения примесей по корке слитка, периодичности продвижения фронта кристаллизации.

На рис. 3 приведено расчетное распределение напряжений в корке заготовки после выхода из кристаллизатора. Расстановка роликов соответствует практике работы МНЛЗ ДМК. Очевиден негладкий характер распределения напряжений по сечению корки заготовки, что объясняется зависимостью расчетных параметров от температуры и химического состава стали в каждой расчетной ячейке, а также влиянием роликовой проводки.

Из рис. 3–4 видно, что, по мере кристаллизации заготовки, растягивающие напряжения смещаются к тепловой оси заготовки и снижаются в процессе остывания заготовки. Причина – увеличение времени релаксации и тенденция к линейризации температурного поля в корке заготовки.

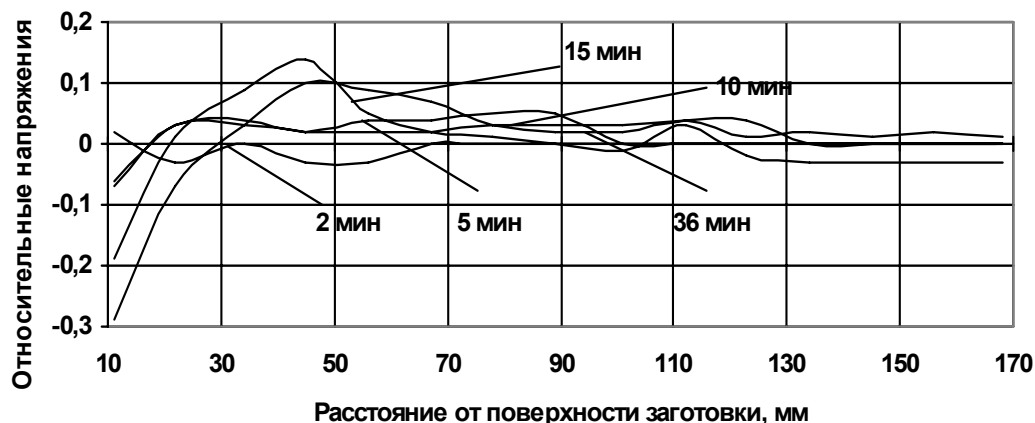


Рис. 3. Изменение относительных напряжений в корке заготовки по ходу процесса разлива

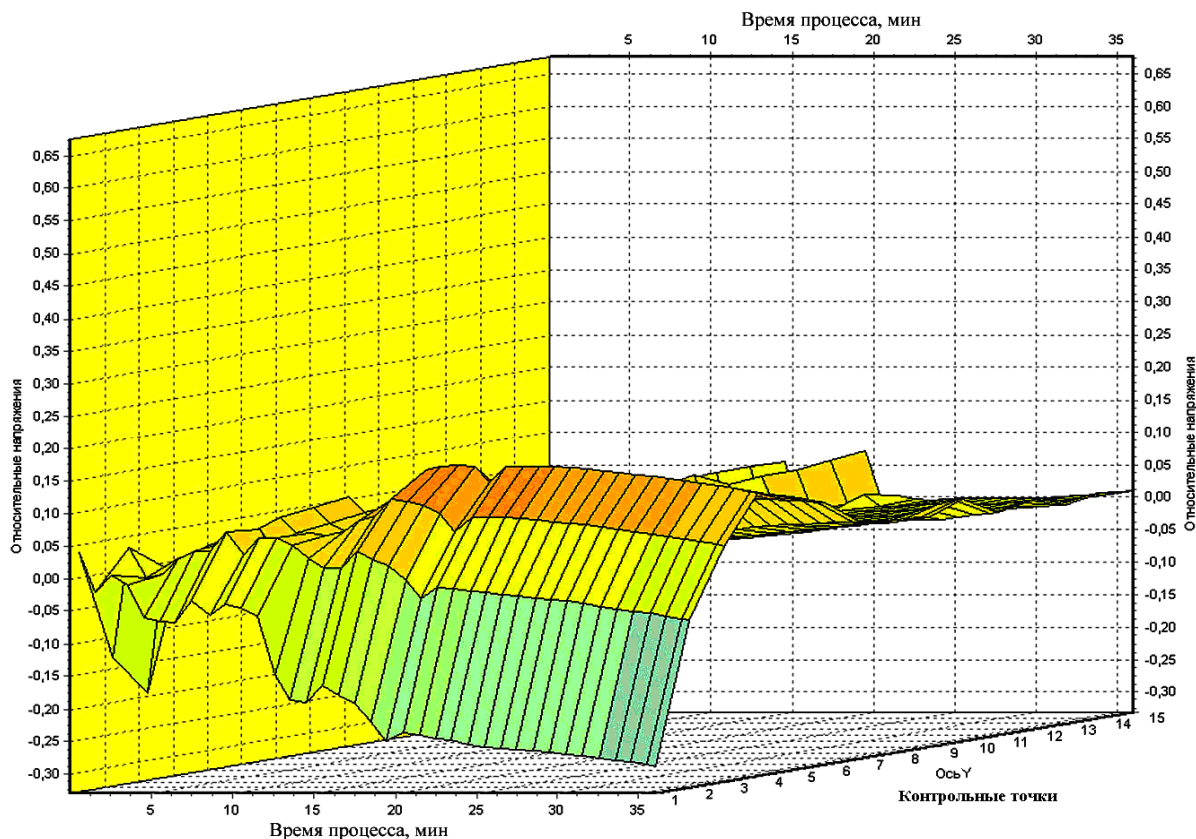


Рис. 4. Динамика относительных напряжений по ходу формирования заготовки сечением 335×400 мм из Ст 20 при скорости разливки 0,6 м/мин

На рис. 5 приведено изменение относительных напряжений на поверхности заготовки. Перегибы на кривой напряжений соответствуют моментам прохождения расчетного сечения через ролики направляющей проводки.



Рис. 5. Изменение напряжений в поверхностном слое заготовки из Ст 20 сечением 335×400 мм, разливаемой со скоростью 0,6 м/мин

Очевидно, что на расстоянии 1–1,5 м от мениска металла по технологической оси МНЛЗ возможен прорыв металла вследствие появления на поверхности слитка растягивающих напряжений. Указанный факт подтверждается практикой работы МНЛЗ ДМК.

После роликовой секции зоны вторичного охлаждения (ЗВО) имеет место некоторое уменьшение сжимающих напряжений. Но, поскольку здесь относительные напряжения не перерастают в растягивающие, трещин на поверхности заготовки ожидать не следует. После

выхода заготовки из бункера ЗВО наблюдается резкое увеличение сжимающих напряжений, что объясняется вторичным разогревом поверхности заготовки. Однако такие напряжения не являются критическими и не приведут к появлению трещин.

После роликовой секции зоны вторичного охлаждения (ЗВО) имеет место некоторое уменьшение сжимающих напряжений. Но, поскольку здесь относительные напряжения не перерастают в растягивающие, трещин на поверхности заготовки ожидать не следует. После выхода заготовки из бункера ЗВО наблюдается резкое увеличение сжимающих напряжений, что объясняется вторичным разогревом поверхности заготовки. Однако такие напряжения не являются критическими и не приведут к появлению трещин.

На рис. 6 приведена динамика изменения максимальных относительных растягивающих и сжимающих напряжений в корке большого радиуса заготовки в процессе формирования слитка сечением 335×400 мм и разливаемого со скоростью 0,6 м/мин. Пики на кривых напряжений соответствуют моменту прохождения рассматриваемого сечения по роликам. Приведенная информация позволяет прогнозировать место и время появления вероятных трещин. Очевидно, что вероятность возникновения внутренних трещин наиболее высока, примерно, на 8, 11, 12, 13, 18, 19 мин времени кристаллизации. Следовательно, именно на этих участках возможно появление трещин. На выходе же из бункера ЗВО напряжения невелики и раскрытие возможных трещин не произойдет.

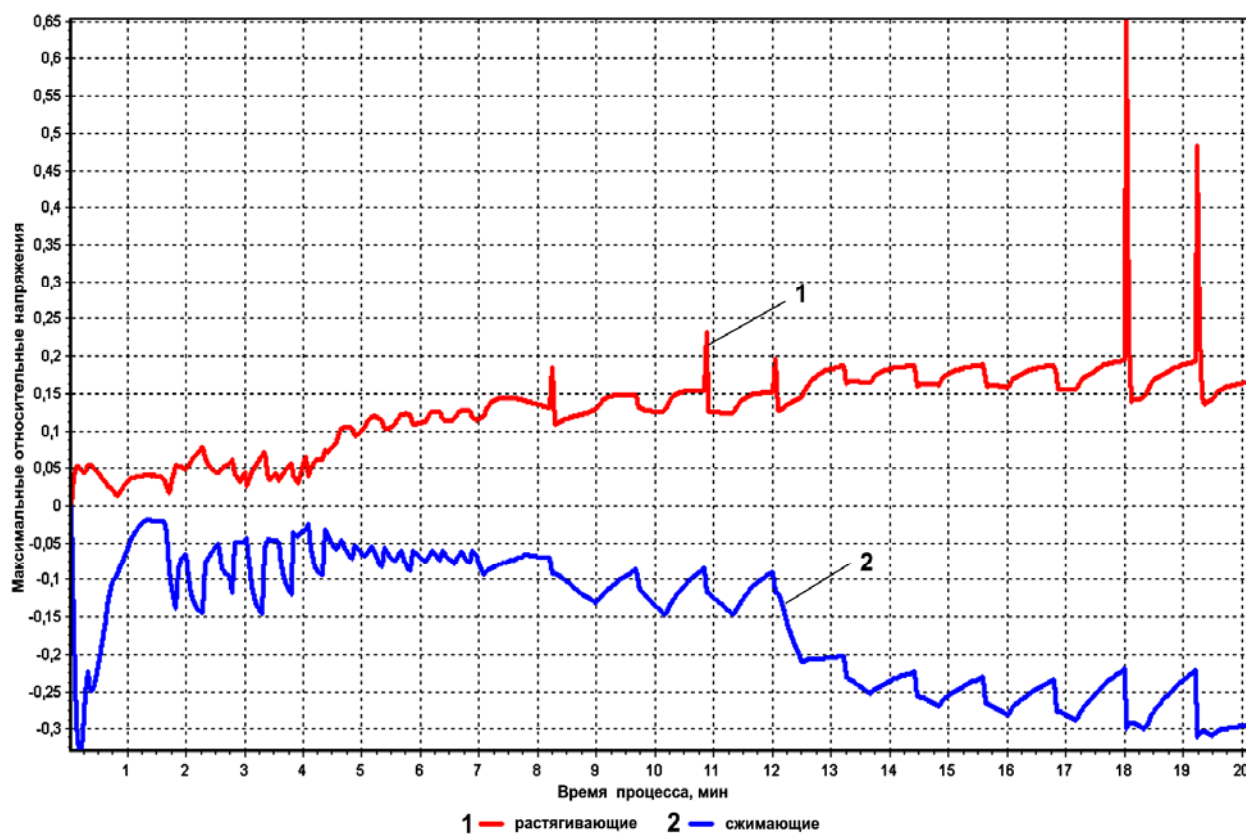


Рис. 6. Динамика максимальных относительных напряжений при базовом варианте охлаждения

Поскольку трещины зарождаются, главным образом, вблизи линии изосолидуса, вероятное место их расположения в объеме заготовки можно определить, исходя из знания закона изменения толщины корки слитка в процессе его кристаллизации. Для этого возможно, например, использовать найденные нами уравнения, справедливые в диапазоне концентраций углерода 0,1–0,7 % и температуры перегрева 10–50 °С:

$$\xi_{\text{сол}} = 37,457 - 0,264 \tau_2 + 8,362 \tau + 0,0039 \tau_3 - 41,019[C] - 0,1434h - 0,096\Delta t_{\text{пер}};$$
$$R = 0,98; R_2 = 0,96; F(6, 2647) = 9859;$$
(14)

$$\xi_{\text{ликв}} = 13,329 + 9,273 \tau - 0,171 \tau_2 + 0,0011 \tau_3 + 29,133[C] - 0,32\Delta t_{\text{пер}} + 0,035h;$$
$$R = 0,97; R_2 = 0,95; F(6, 2647) = 779,$$
(15)

где ξ – толщина корки по линии изосолидуса (индекс «сол») и изоликвидуса (индекс «ликв»), мм; τ – время процесса кристаллизации, мин; $\Delta t_{\text{пер}}$ – температура перегрева металла; h – полутолщина слитка, мм.

Так, например, для показанного на рис. 6 режима разливки заготовки на 18 и 19 мин процесса ее формирования (соответственно, на расстоянии 10,8 и 11,4 м от мениска металла по технологической оси МНЛЗ) появление трещин вероятно на глубине 116–138 мм от поверхности заготовки, что часто наблюдается на практике.

Компьютерная программа исследования термонапряжений, температурного и ликвационного состояния непрерывнолитой заготовки была апробирована на металлургических предприятиях и в вузах Украины и получила положительные отзывы.

ВЫВОДЫ

С помощью численной модели упруго-вязкого термонапряженного состояния кристаллизующейся непрерывнолитой заготовки, которая учитывает термоциклирование поверхности, типоразмер и химический состав заготовки, а также условия прохождения слитка по роликовой проводке МНЛЗ и может быть использована в режиме «советчика-технолога», установлено, что распределение упруго-вязких термических напряжений по ее толщине не носит равномерного характера из-за температуры, влияния роликовой проводки и неравномерного распределения ликватов, что предопределяет различие механических свойств слоев металла. Предложена и апробирована методика и компьютерная программа по определению времени возможного появления и места расположения вероятных трещин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коздоба Л. А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности / Л. А. Коздоба. – М. : Наука, 1975. – 227 с.
2. Огурцов А. П. Численная модель ликвации примесей при непрерывной разливке стали / А. П. Огурцов, А. В. Гресс // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2001. – № 10. – С. 45–50.
3. Гресс А. В. Трехмерная модель процессов теплопереноса в кристаллизаторе блюмовой МНЛЗ / А. В. Гресс, А. П. Огурцов, А. И. Зуев // Математичне моделювання. – 2004. – № 1 (11). – С. 41–45.
4. Гресс А. В. Особенности гидродинамики расплавов в радиальных кристаллизаторах блюмовой МНЛЗ при непрерывной разливке стали через прямоточные погружные стаканы / А. В. Гресс, А. П. Огурцов, Т. М. Титова // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии : сб. науч. тр. – К. : Наукова думка, 2002. – Вып. 5 – С. 155–162.
5. Тепловые процессы при непрерывном литье стали / Ю. А. Самойлович, С. А. Крулевецкий, В. А. Горяинов и др. – М. : Металлургия. – 1982. – 152 с.
6. Ефимов В. А. Разливка и кристаллизация стали / В. А. Ефимов. – М. : Металлургия, 1976. – 552 с.
7. Скок Ю. Я. Механические свойства стали при температурах вблизи солидуса / Ю. Я. Скок. – К. : ИПЛ АН УССР, 1983. – 66 с.
8. Нисковских В. М. Машины непрерывного литья слябовых заготовок / В. М. Нисковских, С. Е. Карпинский, А. Д. Беренов. – М. : Металлургия, 1991. – 272 с.
9. Никитенко Н. И. Сопряженные и обратные задачи теплопереноса / Никитенко Н. И. – К. : Наук. думка, 1993. – 220 с.