

## КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА «ПроНРС-1» И ЗАДАЧИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В МЕТАЛЛУРГИИ СЛИТКОВ

Докт. физ.-мат. наук, проф. ЧИЧКО А. Н.,  
канд. техн. наук ЯЦКЕВИЧ Ю. В.

*Белорусский национальный технический университет*

Развитие оперативной и дисковой памяти ЭВМ открывает широкие возможности расчетов объектов с пространственно распределенными параметрами. В частности, это актуально для решения задач, связанных с получением слитков методом непрерывной разливки стали. Этот аспект крайне важен для задач энергосбережения, так как позволяет предложить новые подходы для оптимизации технологических задач в металлургии. В данной работе рассматривается подход, синтезирующий математические уравнения теории кристаллизации слитков [1] и идеи клеточного автомата, развиваемые в задачах гидродинамического движения реальных расплавов в сложных структурах [2, 3].

Известно, что получение непрерывно-литых заготовок в машине непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) сопровождается одновременным протеканием как минимум четырех физико-химических процессов. Этими процессами являются: 1) гидродинамические процессы течения металла; 2) кристаллизация и охлаждение металлов в условиях изменяющихся коэффициентов теплообмена; 3) диффузия углерода и других элементов в различных точках непрерывно-литой заготовки; 4) многоступенчатые процессы нагрева металла. Параллельно с этим в заготовке происходит процесс упругопластической деформации, который сам по себе является отдельной областью изучения механики сплошных сред. Математическое моделирование каждого из этих процессов представляет собой серьезные математические задачи, которые занимают многих исследователей в течение последних 20 лет. В связи с этим построение математической модели процесса непрерывной разливки стали, учитывающей распределение температур, напряжений и углерода и компьютерная ее реализация, позволяющая рассчитывать кристаллизацию для конкретной МНЛЗ, являются одной из важнейших задач, имеющей как научное, так и практическое значение.

В настоящей статье развивается новый подход, основанный на клеточно-автоматном моделировании процесса непрерывной разливки стали, позволяющий рассчитывать и визуализировать на компьютере трехмерный процесс получения литых заготовок в реальных промышленных условиях. На базе этого подхода в БНТУ разрабатывается компьютерная система «ПроНРС-1», представляющая собой универсальный пакет программ, позволяющий моделировать различные характеристики непрерывно-литого слитка в процессе его вытягивания через кристаллизатор. В основе пакета лежит собственное математическое ядро, построенное на математических уравнениях теплопроводности с учетом функциональных теплот кристаллизации [2...5].

Цель настоящей работы – апробация компьютерной системы «ПроНРС» (версия 1) на процессе формирования промышленного слитка с заданным сечением получаемого в условиях машины непрерывного литья заготовок, используемой на Белорусском металлургическом заводе (МНЛЗ-3).

Математические уравнения, используемые для расчета процесса кристаллизации, представлены в [2...5]. С учетом расхода воды в различных зонах были использованы следующие коэффициенты теплоотдачи: зона 1 – 1200 Вт/(м<sup>2</sup>·К); зона 2 – 464 Вт/(м<sup>2</sup>·К); зона 3 – 232 Вт/(м<sup>2</sup>·К); воздух – 173 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Процесс образования кристалла моделировался как увеличение плотности твердой фазы и уменьшение плотности жидкой фазы в точках пространства с каждым тактом моделирования:

$$\Delta\rho_{sol}(x, y, z, \tau) = \rho(x, y, z, \tau)(T_{lic}(C_{lic}) - T)c(T)/Q_{кр}; \quad (1)$$

$$\rho_{sol}(x, y, z, \tau + \Delta\tau) = \rho_{sol}(x, y, z, \tau) + \Delta\rho_{sol}(x, y, z, \tau); \quad (2)$$

$$\rho_{lic}(x, y, z, \tau + \Delta\tau) = \rho_{lic}(x, y, z, \tau) - \Delta\rho_{sol}(x, y, z, \tau), \quad (3)$$

где  $\rho_{sol}$  – плотность твердой фазы;  $\rho_{lic}$  – плотность жидкой фазы;  $\rho = \rho_{sol} + \rho_{lic}$  – общая плотность металла;  $T_{lic}(C_{lic})$  – температура ликвидуса, зависящая от концентрации углерода в жидкой фазе.

В процессе кристаллизации металла часть углерода из расплава переходит в твердое состояние. В данном случае этот процесс моделировался при помощи полуэмпирической функции, полученной из диаграммы состояния

$$C_{sol} = f(C_{lic}), \quad (4)$$

где  $C_{sol}$  – концентрация углерода на линии солидус, зависящая от температуры;  $C_{lic}$  – концентрация углерода на линии ликвидус, зависящая от температуры.

С учетом изменения массы твердой и жидкой фаз в единице объема концентрация в твердой и жидкой фазах на каждом такте рассчитывалась по формулам:

$$C_{sol}(x, y, z, \tau + \Delta\tau) = \frac{\rho_{sol}(x, y, z, \tau)C_{sol}(x, y, z, \tau) + \Delta\rho_{sol}(x, y, z, \tau)H(C_{lic}(x, y, z, \tau))}{\rho_{sol}(x, y, z, \tau) + \Delta\rho_{sol}(x, y, z, \tau)}; \quad (5)$$

$$C_{lic}(x, y, z, \tau + \Delta\tau) = \frac{\rho_{lic}(x, y, z, \tau)C_{lic}(x, y, z, \tau) - \Delta\rho_{sol}(x, y, z, \tau)H(C_{lic}(x, y, z, \tau))}{\rho_{sol}(x, y, z, \tau) - \Delta\rho_{sol}(x, y, z, \tau)}. \quad (6)$$

Диффузия углерода моделировалась по уравнению

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial C}{\partial z} \right), \quad (7)$$

где  $C$  – концентрация углерода в расплаве в точках  $x, y, z, \tau$ ;  $D$  – коэффициент диффузии углерода в расплаве.

Для расчета термических напряжений используются уравнения равновесия, а также уравнения взаимосвязи напряжений и деформаций для сред Гука и Максвелла [6, 7]. Математическое ядро может изменяться, дополняясь новыми эмпирическими зависимостями и уравнениями, которые можно вводить, чтобы максимально учесть природу протекающих процессов при непрерывной разливке стали.

Одним из важнейших достоинств КС «ПроНПС-1» является работа с реальными промышленными объектами, включающими пространственную конфигурацию кристаллизатора, зоны вторичного охлаждения, а также других элементов МНЛЗ, влияние которых учитывается при компьютерном моделировании процесса. Клеточный автомат, где моделируется процесс, представляет собой неравномерную сеточную структуру, элементы которой – различные материалы (расплав, воздух, кристаллизатор и т. д.). Связь между элементами пространственной структуры непрерывно-литой заготовки задается в виде конечно-разностных аппроксимаций и является приближением используемых дифференциальных уравнений. При расчетах применяются начальные и граничные условия для температур, напряжений и распределения углерода в различных элементах пространственного объекта.

При решении задач моделирования возможна различная дискретизация по пространству и времени машины непрерывной разливки сталей, что, в конечном счете, определяет время расчетов, колеблющееся в интервале от 20 до 80 ч для компьютера Pentium 4. Процесс моделирования может проводиться в несколько этапов путем чередования режимов «Пуск» и «Стоп». В результате формируются файлы размером порядка 200...500 МБ в зависимости от задания временного шага записи, содержащие информацию о полной эволюции температур, напряжений, деформаций, концентрации углерода и т. д. в любых точке и выделенной области кристаллизующегося слитка. Возможны урезанный просмотр всего процесса в режиме «вперед-назад», а также полное графическое представление процессов, происходящих в точках объекта.

В качестве объекта исследования использовался один из вариантов промышленной схемы получения непрерывно-литой типовой заготовки 250×300 мм с конкретными пространственными размерами зоны кристаллизатора, а также трех зон вторичного охлаждения (рис. 1). Общая длина моделируемого слитка составляла 19 м. Все моделируемое пространство было разбито на четыре типа областей, каждое из которых характеризовалось различными коэффициентами теплоотдачи: «сталь – кристаллизатор», «сталь – воздух», «сталь – первая зона охлаждения», «сталь – вторая зона охлаждения», «сталь – третья зона охлаждения». Пространственные положения всех зон и непрерывно литой заготовки были построены в графическом редакторе компьютерной системы «ПроНПС-1». После этого проводили задания начальных и граничных условий системы «слиток – среда». Следует отметить, что компьютерная система позволяет варьировать в трех направлениях зоны вторичного охлаждения и кристаллизатора. В качестве материала заливки использовали высоко-углеродистую сталь 70К и соответствующие ей функциональные теплофизические характеристики: плотность =  $f$  (температура);

удельная теплоемкость =  $f$  (температура); теплопроводность =  $f$  (температура); модуль Юнга =  $f$  (температура); модуль сдвига =  $f$  (температура); теплота кристаллизации; зависимость температур ликвидуса и солидуса от углерода; коэффициенты диффузии углерода в стали; фрагменты диаграммы состояния; теплота фазового превращения «аустенит – перлит» [8]. С помощью «ПроНПС-1» весь объем моделируемого пространства  $380 \times 330 \times 18000$  мм (с учетом среды) был разбит на элементы прямоугольной формы длиной  $\Delta x = 10$  мм, шириной  $\Delta z = 10$  мм и высотой  $\Delta y = 20$  мм. Приращение температуры в одном элементе определялось через интервал времени  $\Delta t = 0,08$  с. Скорость движения слитка в МНЛЗ-3 составляла 0,75 м/мин.

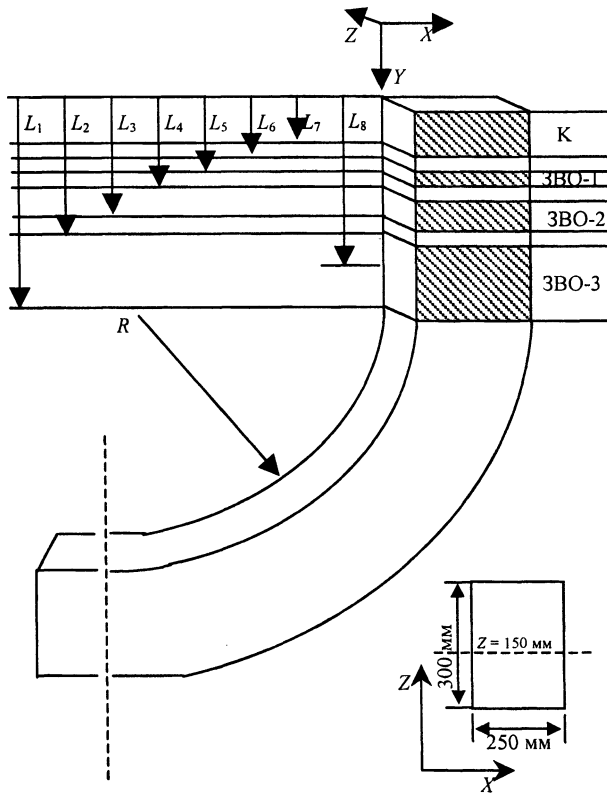


Рис. 1. Расчетная схема кристаллизующегося слитка с поперечным сечением  $250 \times 300$  мм в машине непрерывного литья заготовок с кристаллизатором (К) и зонами вторичного охлаждения (ЗВО-1, ЗВО-2, ЗВО-3), построенная на основе МНЛЗ-3 (РУП «БМЗ»):  $L_1 = 3,839$  м;  $L_2 = 2,181$ ;  $L_3 = 1,913$ ;  $L_4 = 1,317$ ;  $L_5 = 1,170$ ;  $L_6 = 0,876$ ;  $L_7 = 0,800$ ;  $L_8 = 2,746$  (изгиб);  $R = 10$  м

Результаты моделирования представлены на рис. 2...4. На рис. 2а показано распределение температур по всей длине слитка для точек, находящихся на различном расстоянии от поверхности. Как видно из рисунка, на поверхности слитка температура изменяется сложным образом при ярко выраженном переохлаждении ( $x = 0,005$  м). Чем дальше от поверхности находится точка и ближе к центральной части слитка, тем меньше глубина переохлаждения. Следует отметить, что на температурной кривой четко прослеживаются три участка зоны вторичного охлаждения, на которых температура поверхности увеличивается. Распределение температуры

по сечению слитка симметрично относительно центра и имеет характерный подъем к центральной части слитка (рис. 2б). Это согласуется с физической картиной процесса кристаллизации, характеризующейся сменой тепловых коэффициентов теплоотдачи, заложенной в зоне вторичного охлаждения.

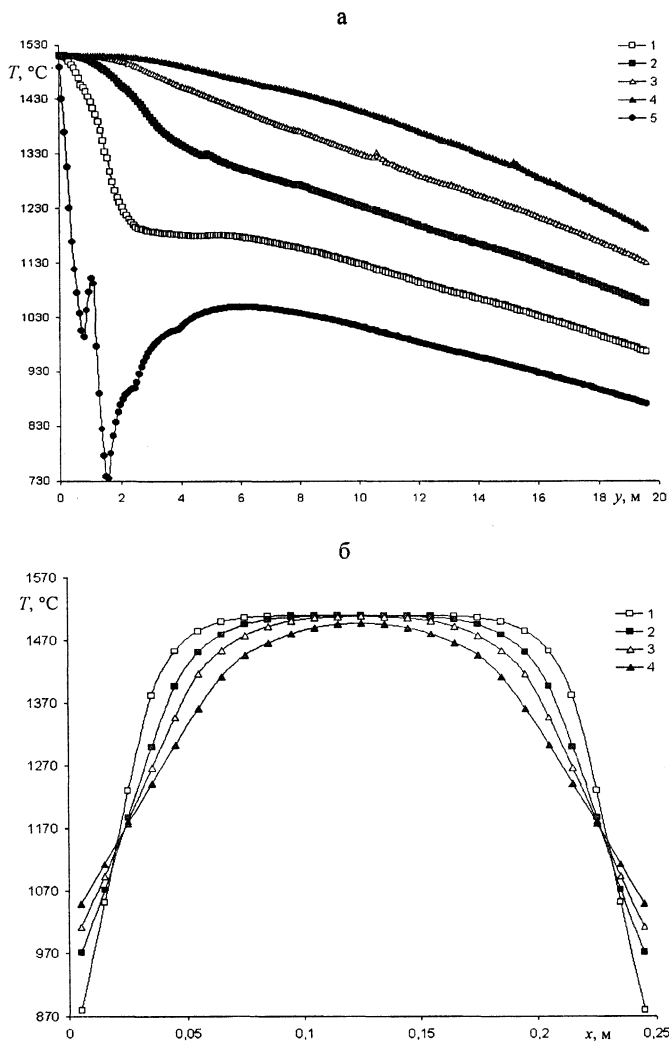


Рис. 2. Распределение температур в слитке для выделенных направлений по его длине при  $1 - x = 0,025$  м;  $2 - 0,045$ ;  $3 - 0,065$ ;  $4 - 0,085$ ;  $5 - 0,005$  м (а) и в поперечном сечении при  $1 - y = 2$  м;  $2 - 3$ ;  $3 - 4$ ;  $4 - 6$  м (б)

Наиболее сложный ход кривой охлаждения соответствует точке  $x = 0,005$  м от границы слитка, что связано с ярко выраженным фазовым переходом «жидкость – твердое тело» и теплотой выделения твердой фазы, учитываемой в расчете.

На рис. 3 представлено расчетное распределение термических напряжений для выделенных направлений непрерывно литой заготовки, из которого видно, что изменение положения точки в поперечном сечении приводит к увеличению положительных (сжимающих) напряжений. В то же время для точек вблизи поверхностной зоны слитка ( $x \leq 0,005$  м)

наблюдается рост отрицательных (растягивающих) напряжений, которые особенно сильно проявляются в переходной зоне «кристаллизатор – воздух». При движении слитка от поверхности к центру наблюдается рост сжимающих напряжений с «всплесками», соответствующими фазовому переходу «жидкость – твердое тело». Рассматривая сечение слитка (рис. 3б), можно видеть переходы от отрицательных к положительным напряжениям, что может являться причиной образования трещин в заготовке. Именно повышение критического значения градиента растягивающих и сжимающих напряжений приводит к накоплению внутренних трещин с трансформацией их в наружные, что можно получать с помощью компьютерных расчетов.

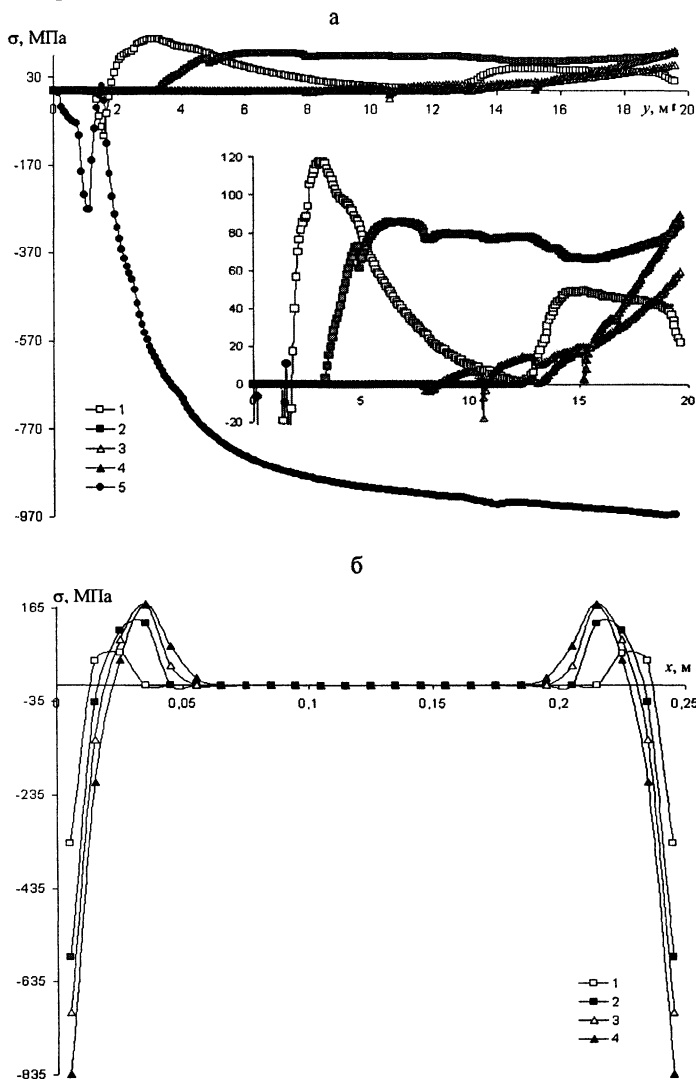


Рис. 3. Распределение напряжений в слитке для выделенных направлений по его длине: при 1 –  $x = 0,025$  м; 2 –  $0,045$ ; 3 –  $0,065$ ; 4 –  $0,085$ ; 5 –  $0,005$  м (а) и в поперечном сечении при 1 –  $y = 2$  м; 2 – 3; 3 – 4; 4 – 6 м (б)

Одним из важнейших вопросов металлургии слитков является проблема ликвационных полосок, возникающих на различных участках, движущее-

гося в МНЛЗ слитка. В компьютерной системе «ПроНПС-1» проводится расчет трехмерного распределения углерода по длине (рис. 4а) заготовки и в ее поперечном сечении (рис. 4б) во времени на основе решения диффузионной задачи. Как видно из рисунков, кристаллизация и охлаждение приводят к ликвации углерода вследствие диффузии в центр слитка, что является причиной неравномерного распределения свойств заготовки. Варьирование термическими режимами охлаждения, скоростью вытягивания, температурами заливки позволяет рассчитывать распределение углерода в различных сечениях и на основе этого разрабатывать способы получения однородной структуры слитка.

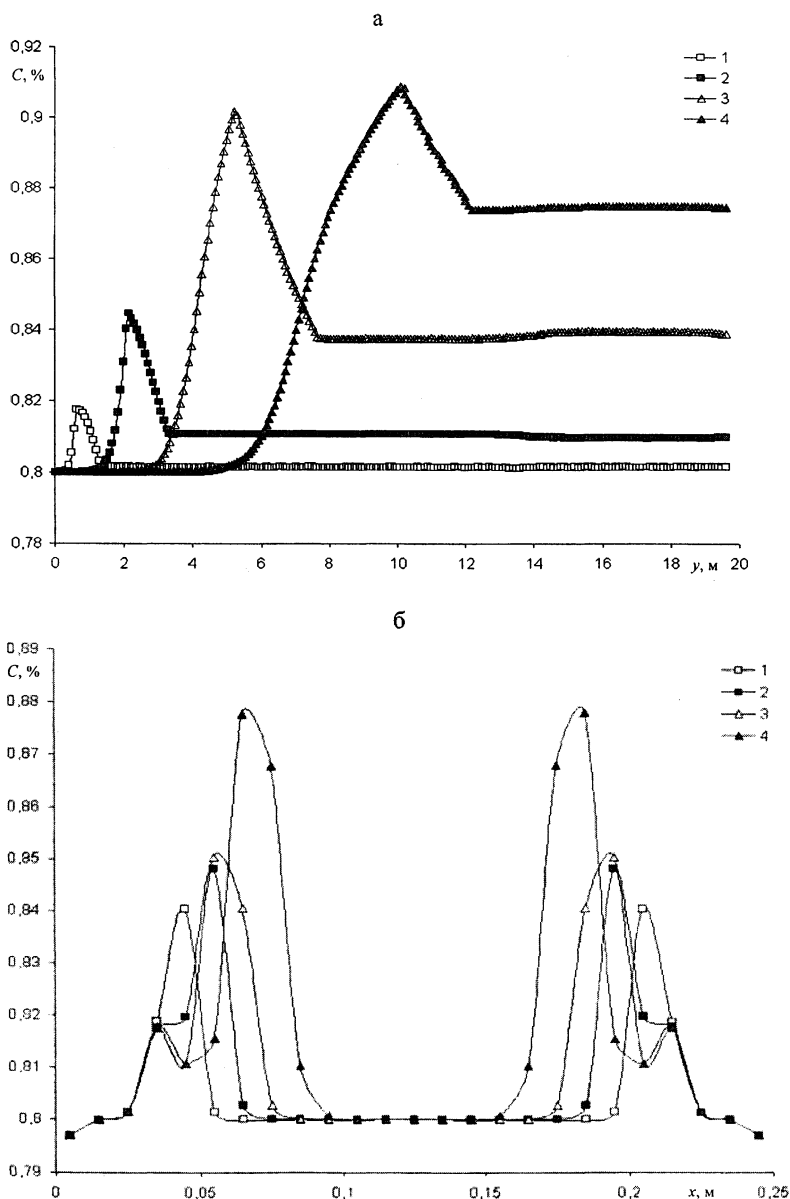


Рис. 4. Распределение углерода в слитке для выделенных направлений по его длине: при 1 -  $x = 0,025$  м; 2 -  $0,045$ ; 3 -  $0,065$ ; 4 -  $0,085$  м (а) и в поперечном сечении: при 1 -  $y = 2$  м; 2 - 3; 3 - 4; 4 - 6 м (б)

Таким образом, проведенные исследования показывают широкие возможности компьютерной системы «ПроНРС-1» при моделировании процесса непрерывного литья заготовок. В частности, по расчетам температур, напряжений и распределения углерода по всей длине слитка. Это может быть использовано при выявлении существующих проблем технологического процесса на металлургическом предприятии, а также для разработки новых технологических решений с целью повышения качества слитков. При этом варьируемыми параметрами могут являться как термические режимы в зоне кристаллизатора и зонах вторичного охлаждения, так и вся пространственная конфигурация МНЛЗ. В качестве критериев оценки эффективности моделируемой технологии могут использоваться разрабатываемые интегральные характеристики процесса кристаллизации, а также критическая величина возникающих напряжений по всей длине слитка по отношению к пределу прочности используемой стали. Применение компьютерной системы «ПроНРС-1» на предприятиях может открыть новые возможности для разработки технологических процессов, в основе которых лежит метод непрерывного литья заготовок, что позволит уменьшить временные затраты на отработку оптимальной технологии и повысить уровень автоматизации технологических разработок.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. С о б о л е в В. В., Т р е ф и л о в П. М. Процессы тепломассопереноса при затвердевании непрерывных слитков. – Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1984. – 264 с.
2. Ч и ч к о А. Н., Л и х о у з о в С. Г. Клеточно-автоматное моделирование процесса течения расплава в форме // Докл. НАН Беларуси. – 2001. – Т. 45, № 4. – С. 110–114.
3. Ч и ч к о А. Н., С о б о л е в В. Ф., Л и х о у з о в С. Г. Компьютерная система «ПроЛит» – инструмент для повышения качества // ТЭО. – 2001. – № 6. – С. 30–31.
4. Ч и ч к о А. Н., Я ц к е в и ч Ю. В. Трехмерное компьютерное моделирование охлаждения отливки и выбор питателя литниковой системы на основе уравнения теплопроводности // ИФЖ. – 1999. – Т. 72. – С. 797–801.
5. Chichko A., Yatskevich V., Sobolev V. Three-dimentional computer modeling of alloys flow and foundry technology // Proceeding International Conference in Bratislava. – 1999. – Vol. 2. – P. 672–675.
6. Ч и ч к о А. Н., Я ц к е в и ч Ю. В., С о б о л е в В. Ф. Трехмерное математическое моделирование термонапряженного состояния стальной детали // Литье и металлургия. – 2001. – № 4. – С. 82–84.
7. Ч и ч к о А. Н., Д р о з д о в Е. А., Ч и ч к о О. И. Трехмерное математическое моделирование термоупругих характеристик сплава в условиях многократных термических нагрузок // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2002. – № 2. – С. 122–127.
8. М а р о ч н и к сталей и сплавов / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова, С. А. Вяткин и др.; Под общ. ред. В. Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.

Представлена кафедрой  
машин и технологий  
литейного производства

Поступила 8.10.2004