



*The authors are developing the new approach, based on the cellwise automatic modelling of the continuous steel casting process, allowing to calculate and visualize on computer the threedimensional process of cast slugs production in real industrial conditions.*

А. Н. ЧИЧКО, Д. М. КУКУЙ, В. Ф. СОБОЛЕВ, Ю. В. ЯЦКЕВИЧ, С. Г. ЛИХОУЗОВ,  
О. И. ЧИЧКО, Е. А. ДРОЗДОВ, Белорусский национальный технический университет

УДК 669.27:519

## КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА «ПроНРС» И ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР, НАПРЯЖЕНИЙ И УГЛЕРОДА В ПРОЦЕССЕ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ

Известно, что получение непрерывнолитых заготовок в УНРС сопровождается одновременным протеканием как минимум четырех физико-химических процессов: 1) гидродинамические процессы течения металла; 2) кристаллизация и охлаждение металлов в условиях изменяющихся коэффициентов теплообмена; 3) диффузия углерода и других элементов в различных точках непрерывнолитой 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 [1]. Чтобы решать задачи моделирования процесса НРС (непрерывной разливки стали), необходимы усилия многих специалистов – физиков, математиков, металлургов, программистов и др. В связи с этим построение общей математической модели процесса НРС, учитывающей распределение температур, напряжений и углерода и компьютерная реализация ее, позволяющая рассчитывать конкретные заготовки, является одной из важнейших задач, имеющей как научное, так и практическое значение.

Авторами статьи 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 Белорусском национальном техническом университете (лаборатория компьютерного моделирования технологических процессов кафедры МиТЛП) развивается компьютерная система «ПроНРС», представляющая собой

универсальный пакет программ, который дает возможность моделировать различные характеристики непрерывнолитой заготовки. В основе пакета лежит открытое математическое ядро, построенное на математических уравнениях Навье–Стокса (закон сохранения импульса) [2, 3], уравнениях теплопроводности с учетом функциональных теплот кристаллизации [4, 5], уравнениях диффузии, равновесия, уравнениях связи 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.

Одно из важнейших достоинств разрабатываемой КС «ПроНРС» – работа с промышленными объектами, включающими в себя пространственную конфигурацию кристаллизатора, зоны вторичного охлаждения, а также других элементов УНРС, которые могут учитываться при компьютерном моделировании процесса. Клеточный автомат, моделирующий процесс, представляет собой неравномерную сеточную структуру, элементами которой являются различные материалы (расплав, воздух, кристаллизатор и т.д.). Связь между элементами пространственной структуры непрерывнолитой 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 УНРС и времени, что в конечном счете определяет время расчетов, колеблющееся от 20 до 100 ч для компьютера Pentium 3. Процесс моделирования может

проводиться в несколько этапов путем чередования режимов «Пуск» и «Стоп». В результате моделирования формируются файлы, имеющие размер порядка 200 – 500 МБ, содержащие информацию о полной эволюции температур, напряжений, деформаций, концентрации углерода и т. д. в любой точке и в любой выделенной области элемента объекта УНРС. Возможен урезанный просмотр всего процесса в режиме «вперед–назад», а также полное графическое представление процессов, происходящих в точках объекта.

Целью настоящей работы является апробация компьютерной системы «ПроНРС» (версия 1) на процессе формирования промышленного слитка с заданным сечением.

В качестве объекта исследования использовался один из вариантов промышленной схемы получения непрерывной заготовки с конкретными размерами зоны кристаллизатора, а также трех зон вторичного охлаждения (рис. 1). Общая длина моделируемого слитка составляла 18 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». Пространственное положение всех зон и непрерывной заготовки было построено в графическом редакторе компьютерной системы «ПроНРС». Затем проводили задания начальных и граничных условий системы «объект – среда». Следует отметить, что компьютерная система позволяет варьировать в трех направлениях зоны вторичного охлаждения и кристаллизатора. В качестве материала заливки использовали высокоуглеродистую сталь (У8) 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 температуры ликвидуса и солидуса от углерода; коэффициенты диффузии углерода в стали; фрагменты диаграммы состояния; теплота фазового превращения аустенит – перлит [8]. С помощью «ПроНРС» весь объем моделируемого пространства 380 x 330 x 18 000 мм (учтена среда) был разбит на элементы прямоугольной формы с 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.

На рис. 2 представлен интерфейс системы «ПроНРС», из которого можно видеть расположение элементов моделируемого объекта. Результаты моделирования приведены на рис. 3–10. На рис. 3 показаны кривые охлаждения заготовки по его длине для различных точек поперечного сечения

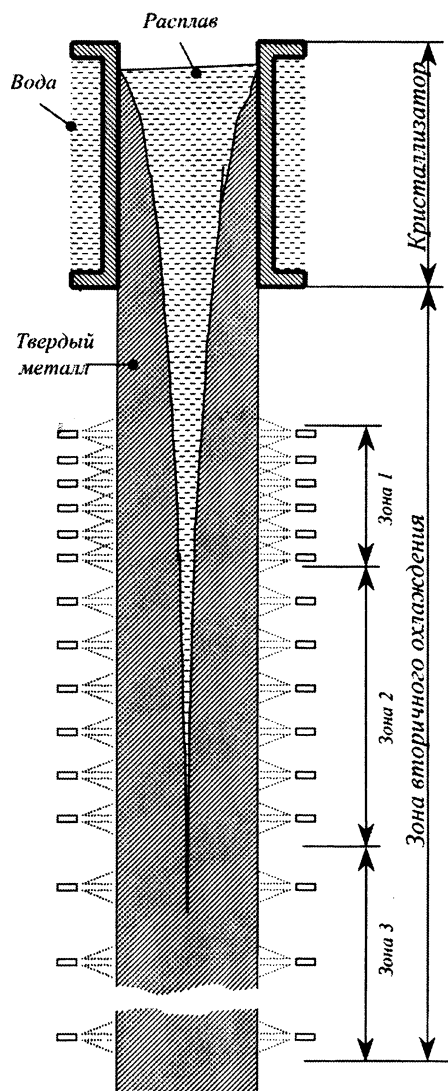


Рис. 1. Схема установки для непрерывной разливки стали

$x=10(i-1)+5$  (мм). Из рисунка видно, что изменение положения точки от поверхности слитка к его центру сопровождаются уменьшением переохлаждения, что соответствует физике процесса охлаждения заготовки в УНРС. Наиболее сложный ход кривой охлаждения соответствует точке  $x=5$  мм от края слитка, что связано с ярко выраженным фазовым переходом «жидкость – твердое тело» и теплотой выделения твердой фазы, учитываемой в расчете. На рис. 4 представлены расчетные и экспериментальные данные (взяты из [9]) по кривым охлаждения непрерывной заготовки. Из рисунка видно их удовлетворительное согласование, что свидетельствует об адекватности используемой модели. На рис. 5 представлено расчетное распределение термических напряжений для выделенной плоскости непрерывной заготовки. Видно, что изменение положения точки в поперечном сечении приводит к увеличению положительных (сжимающих) напряжений. В то же время для точек вблизи поверхностной зоны слитка ( $x \leq 5$  мм) наблюдается рост отрицательных

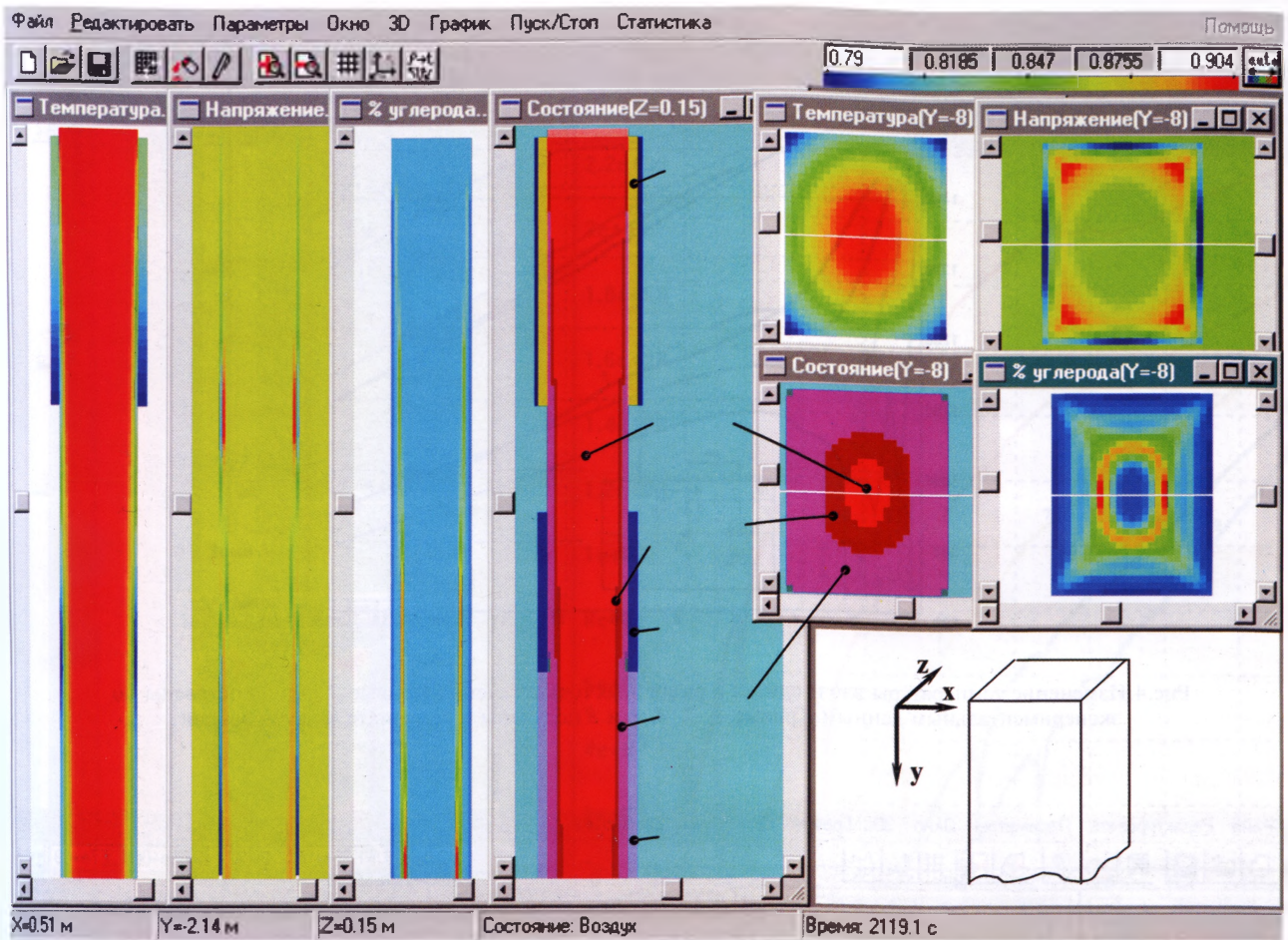


Рис.2. Интерфейс компьютерной системы

(растягивающих) напряжений, которые особенно сильно проявляются в переходной зоне «кристаллизатор–воздух». При движении элемента слитка от поверхности к центру наблюдается рост сжимающих напряжений с «всплесками», соответствующими фазовому переходу «жидкость–твердое тело» (рис. 6, 7). Рассматривая сечение слитка (рис. 8), видны 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 получить с помощью компьютерных расчетов.

С помощью системы «ПроНПС» можно «увидеть» расчетное трехмерное распределение углерода по длине (рис. 9) заготовки и в ее поперечном сечении (рис. 10). Как видно из рисунков, кристаллизация и охлаждение приводят к ликвации углерода в центр слитка, что служит причиной неравномерного распределения свойств заготовки. Предварительно проведенные компьютерные расчеты для различных термических режимов позволяют прогнозировать распределение углерода и на основе этого разрабатывать способы получения однородной структуры.

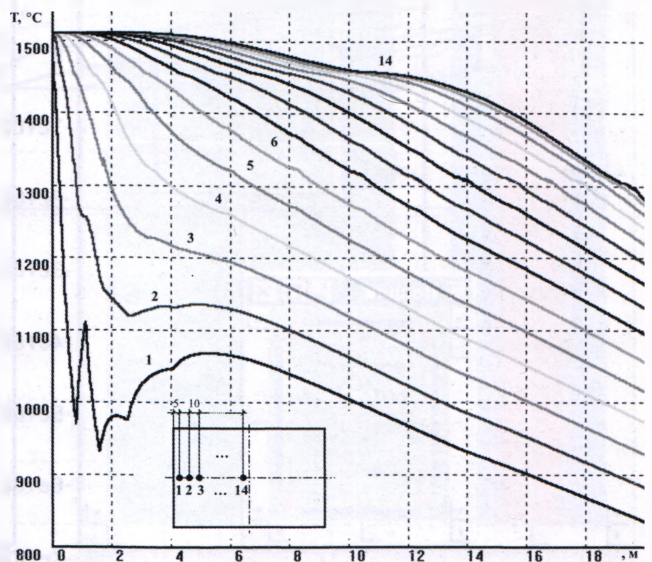


Рис.3. Численное решение термических кривых охлаждения для различных точек непрерывнолитого списка

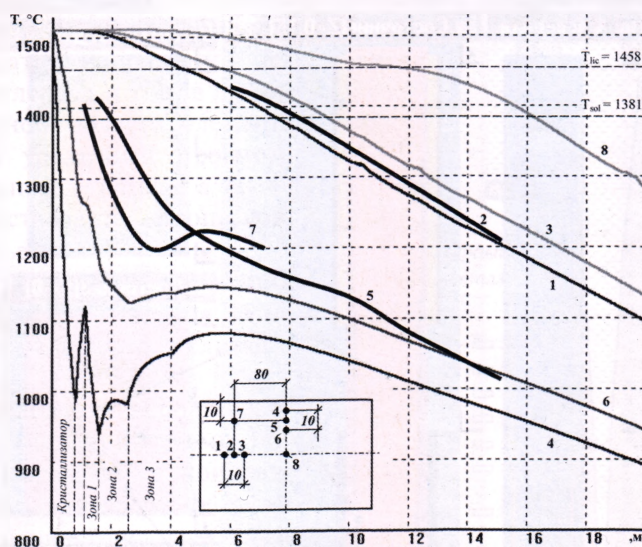


Рис.4. Изменение температуры вдоль слитка в различных точках сечения. Кривые 2, 5 и 7 построены по экспериментальным данным. Кривые 1, 3, 4, 6 и 8 получены в результате моделирования

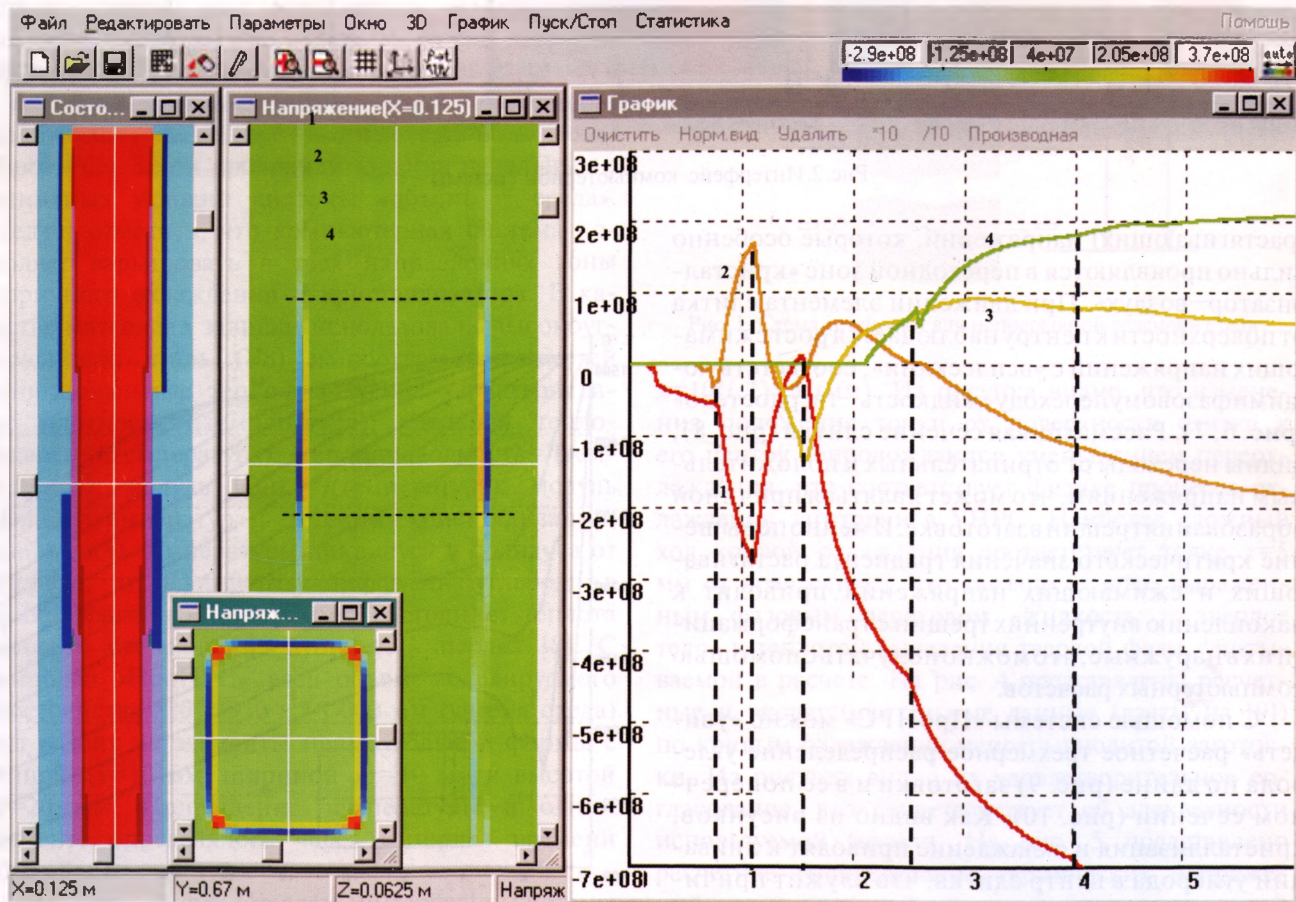


Рис.5. Распределение напряжений в трехмерном слитке размером поперечного сечения по его длине для различных расстояний от поверхности: 1 - 5, 2 - 15, 3 - 25, 4 - 35 мм (сечение  $X=125$  мм)

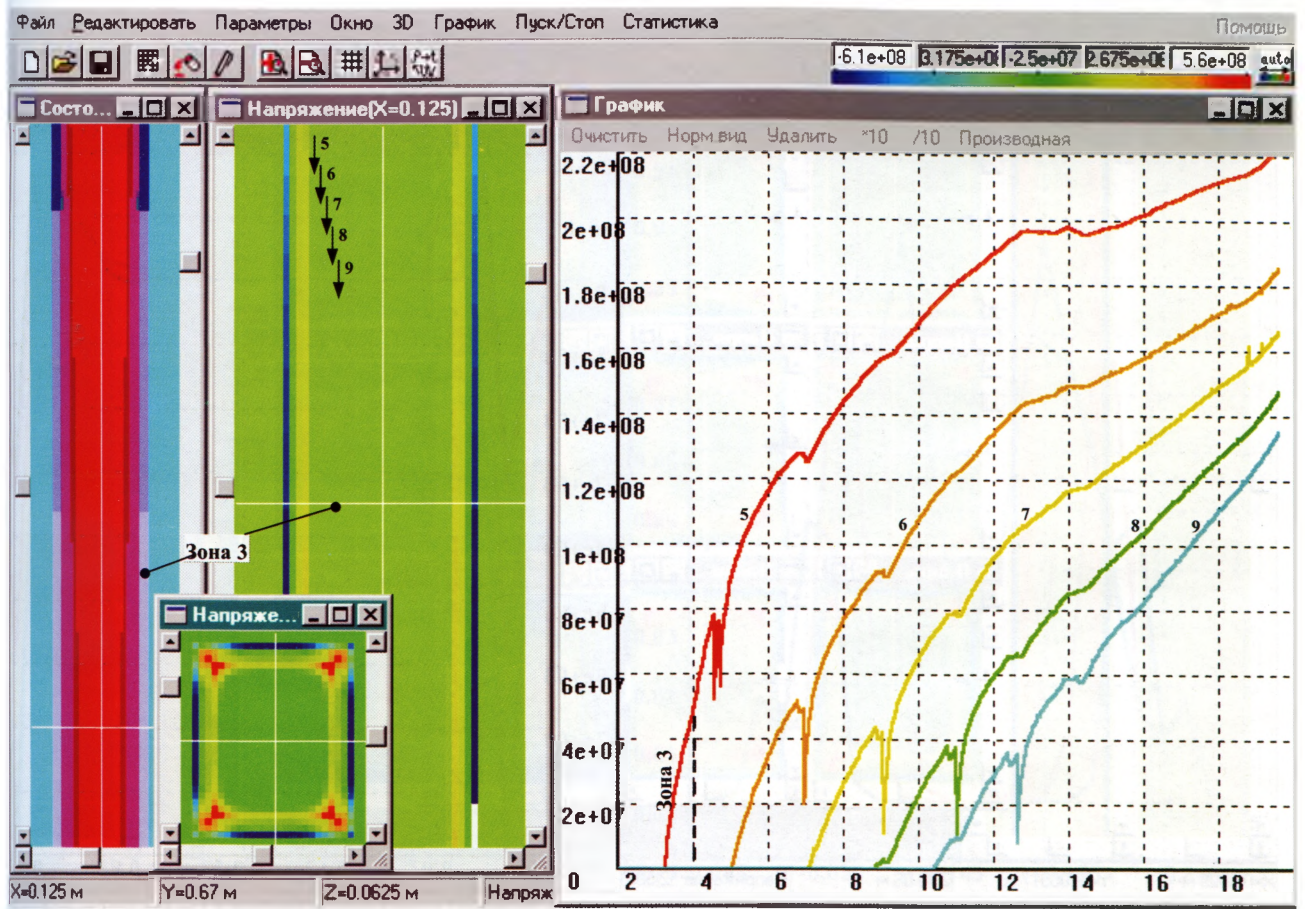


Рис. 6. Распределение напряжения в трехмерном слитке по его длине для различных расстояний от поверхности: 5 – 45; 6 – 55; 7 – 65; 8 – 75; 9 – 85 мм (сечение  $X=125$  мм)

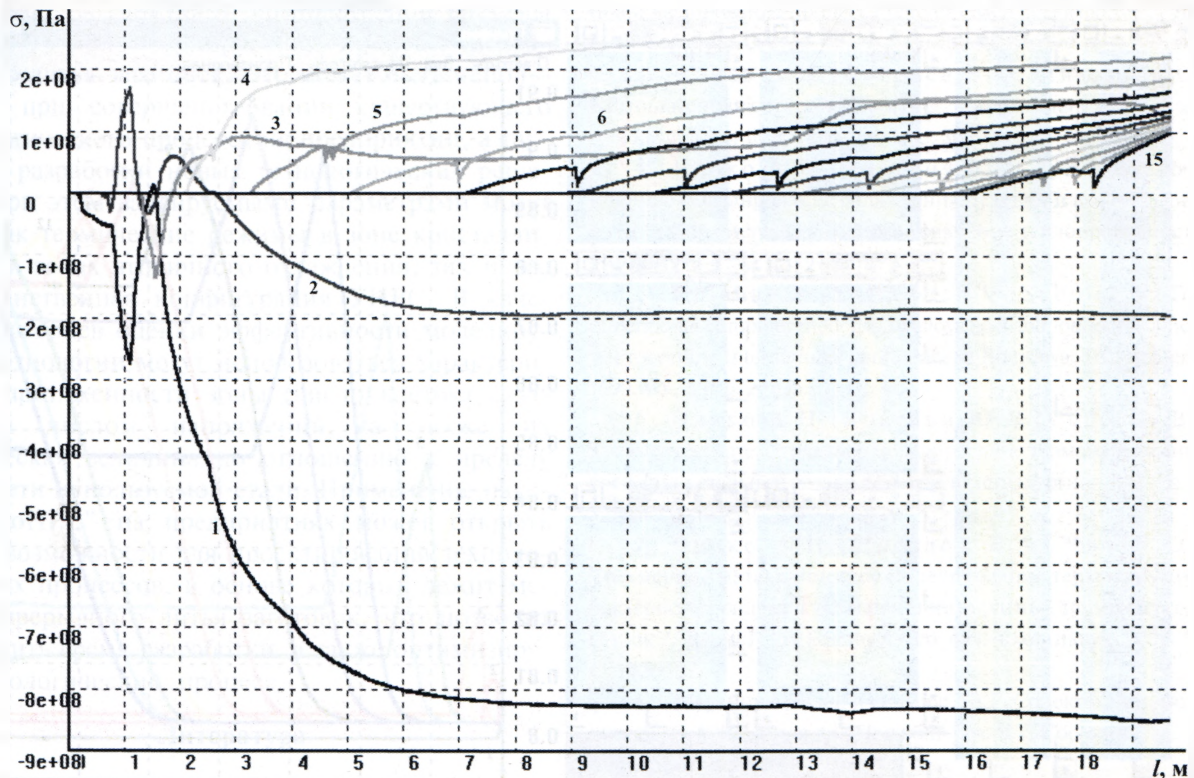


Рис. 7. Распределение напряжения в трехмерном слитке по его длине  $\sigma=f(l)$  для различных слоев слитка от поверхности: 1 – 5 мм (поверхность слитка), 2 – 15; 3 – 45; 4 – 55; 5 – 65; 6 – 75 мм;...; 15 – 145 мм (центр слитка)

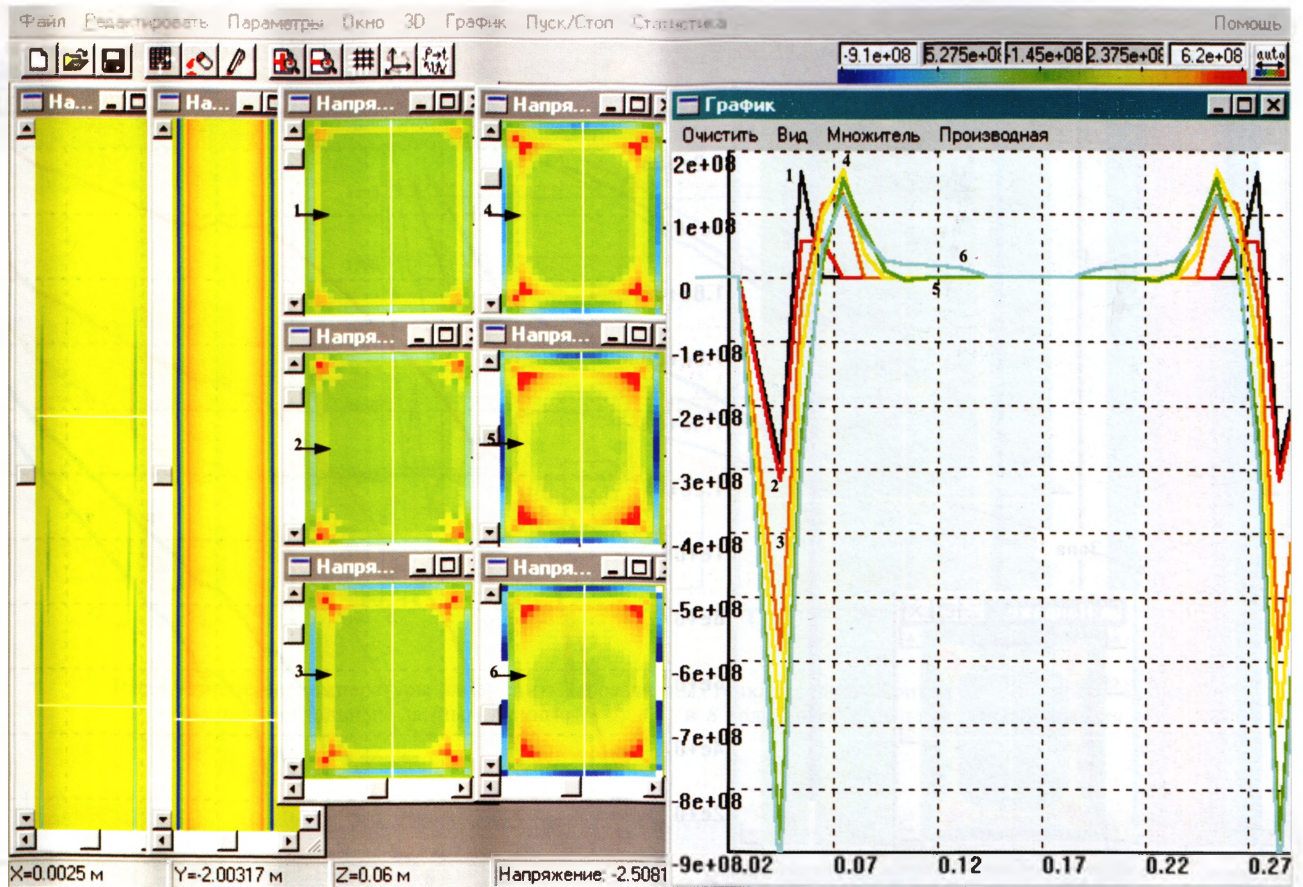


Рис. 8. Распределение напряжений в различных сечениях по длине слитка: 1 –  $y=1$  м (начало зоны 1); 2 – 2; 3 – 3; 4 – 4 (конец зоны вторичного охлаждения); 5 – 8; 6 – 15 м

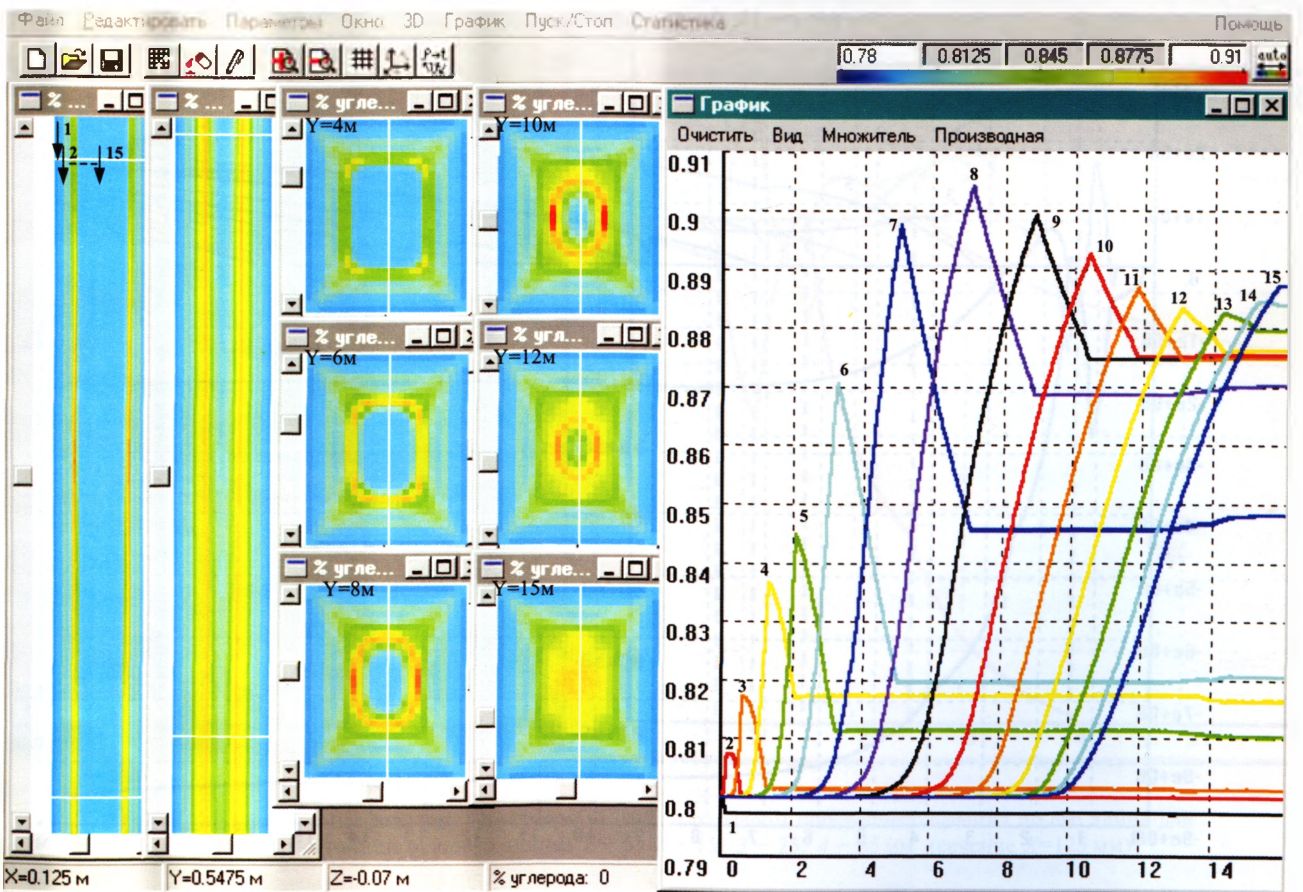


Рис. 9. Распределение углерода в трехмерном слитке по его длине  $C=f(l)$  для различных расстояний от поверхности: 1 – 5 мм (поверхность слитка); 2 – 15; ... ; 15 – 145 мм (центр слитка)

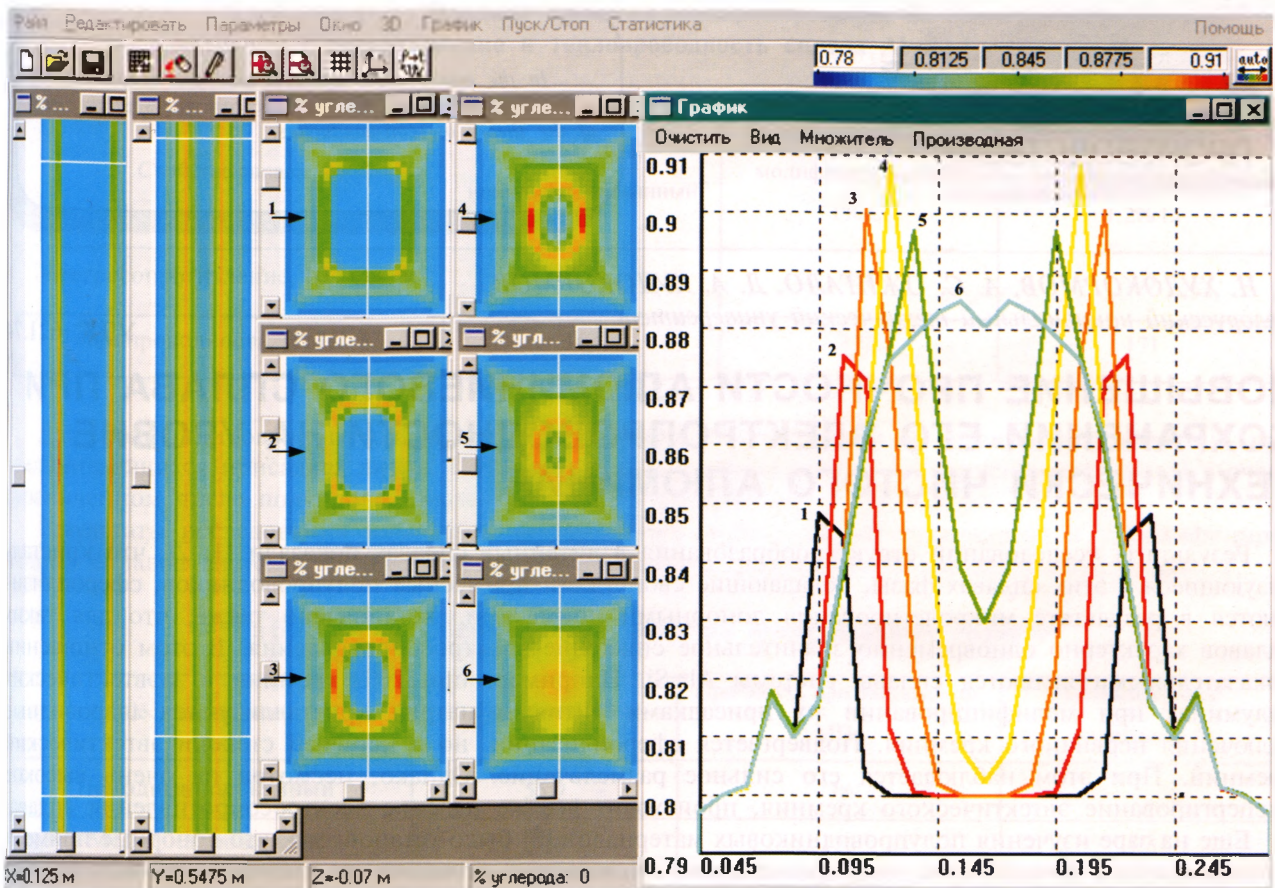


Рис. 10. Распределение углерода в различных сечениях по длине слитка: 1 – 4 м (конец зоны вторичного охлаждения); 2 – 6; 3 – 8; 4 – 10; 5 – 12; 6 – 15 м

Таким образом, проведенные исследования показывают возможности компьютерной системы “ПроНРС” при моделировании процесса непрерывного литья заготовок. Это может быть использовано при совершенствовании существующего технологического процесса на предприятии, а также для разработки новых технологических решений. При этом варьируемыми параметрами могут быть как термические режимы в зоне кристаллизатора и зонах вторичного охлаждения, так и вся пространственная конфигурация УНРС. В качестве критериев оценки эффективности моделируемой технологии могут использоваться характеристики протяженности зоны (число клеток) с заданным числом напряжений, а также их критическая величина по отношению к пределу прочности используемой стали. Применение пакета “ПроНРС” на предприятиях может открыть новые возможности для проектирования технологических процессов, в основе которых лежит метод непрерывного литья заготовок, что позволит уменьшить время разработки, а также оптимизирует технологический процесс.

### Литература

1. Соболев В. В., Трефилов П. М. Процессы теплопереноса при затвердевании непрерывных слитков. Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1984.
2. Чичко А. Н., Лихоузов С. Г. Клеточно-автоматное моделирование процесса течения расплава в форме // Докл. НАН Беларуси. 2001. Т. 45. № 4. С. 110–114.
3. Чичко А. Н., Соболев В. Ф., Лихоузов С. Г. Компьютерная система “ПроЛит” – инструмент для повышения качества // ТЭО. 2001. № 6. С. 30–31.
4. Чичко А. Н., Яцкевич 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-dimensional computer modeling of alloys flow and foundry technology // Proceeding International conference in Bratislava. Technologia 99. 1999. Vol. 2. P. 672–675.
6. Чичко А. Н., Яцкевич Ю. В., Соболев В. Ф. Трехмерное математическое моделирование термонапряженного состояния стальной детали // Литье и металлургия. 2001. № 4. С. 82–84.
7. Чичко А. Н., Дроздов Е. А., Чичко 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. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин, А. В. Волонникова, С. А. Вяткин и др.; Под общ. ред. В. Г. Сорокина. М.: Машиностроение. 1989.
9. Тимошпольский В. И. Теплотехнические основы металлургических процессов и агрегатов высшего технического уровня. Мн.: Навука і тэхніка, 1995.