

*There are presented the computer calculations of longitudinal stresses of the crystallizing continuously cast ingot, being cooled by flat-flame spray burners. The character of the stresses changes in the zone of secondary cooling along the length of ingot and in the different cross sections is established. The possibility of occurrence of the longitudinal stresses skewness in the ingot cross section is shown.*

А. Н. ЧИЧКО, БНТУ, Н. В. АНДРИАНОВ, А. В. ДЕМИН, РУП «БМЗ»,  
Д. М. КУКУЙ, В. Ф. СОБОЛЕВ, Ю. В. ЯЦКЕВИЧ, О. И. ЧИЧКО, БНТУ

УДК 669.27:519

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ПРОГРАММЫ «ПРОНРС-2» ПРОДОЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СЛИТКЕ, ОХЛАЖДАЕМОМ ПЛОСКОФАКЕЛЬНЫМИ ФОРСУНКАМИ

Одним из важнейших направлений исследования свойств слитка, получаемого методом непрерывной разливки стали, является компьютерное моделирование и расчеты напряжений, формирующихся при кристаллизации металла. Работы 80–90-х годов по расчетам непрерывнолитых слитков [1, 2] создали хорошую математическую базу для проведения компьютерных исследований напряженного состояния слитка. Предложенные в работах [3–5] клеточно-автоматные математические модели позволили провести оригинальные расчеты полей температур и напряжений, возникающих в трехмерном слитке. Дальнейшим развитием этих работ является разработка метода расчета продольных напряжений в кристаллизующемся слитке, движущемся по радиальному изгибу.

Целью настоящей работы является компьютерное моделирование продольных напряжений слитка, получаемого методом вытягивания в машине непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) при плоскофорсуночном водяном охлаждении.

В основу работы положена технологическая схема МНЛЗ-3, используемая на Белорусском металлургическом заводе (РУП «БМЗ»). При этом в зоне вторичного охлаждения (ЗВО) использовано плоскофакельное форсуночное охлаждение, которое применяется на данном предприятии при получении слитков. Зона вторичного охлаждения разбита на три секции, в каждой из которых имеется свой расход воды, характеризуемый различным числом форсунок. В третьей ЗВО движущийся слиток начинает деформироваться и в дальнейшем перемещается по дуге, близкой к четверти окружности. В результате этого в слитке возникают механические напряжения за счет изгиба слитка, которые накладываются на термические напряжения, возникающие в зонах вторичного охлаждения. Суперпозиция механических и термических напряжений создает нелинейную картину распределения напряжений в слитке, что, в конечном счете, влияет на качество получаемого слитка.

Для проведения детальных компьютерных расчетов кристаллизующегося слитка можно использовать идеологию клеточно-автоматных методов, математической базой которой является метод сеток. В применении к решаемым задачам слиток разбивается на пространственные элементы заданного размера. Каждому элементу присваивается набор свойств в зависимости от того, где этот элемент находится. В качестве свойств используются теплопроводность, теплоемкость, плотность, модуль Юнга, характеристики пределов упругости и прочности.

В качестве математической модели для расчета температур использовали трехмерное уравнение теплопроводности, учитывающее процесс кристаллизации [6, 7], для расчета полей напряжений – математическую модель термонапряженного состояния [8, 9]. Модель учитывала пластические деформации, возникающие в процессе движения слитка. Для проведения расчетов использовали компьютерную систему, разрабатываемую в Белорусском национальном техническом университете для решения разнообразных проблем металлургического производства (сайт CAEGROUP.BNTU.BY).

В качестве анализируемых были выбраны нормальные напряжения. Расчет проекции нормальных напряжений на вертикальной оси слитка производили исходя из допущения, что каждый элемент горизонтального слоя слитка деформируется одинаково. В начальный момент времени все элементы модели имели одинаковую высоту, соответствующую вертикальному шагу конечно-разностной сетки  $\Delta y$ . В процессе моделирования шаг сетки изменялся в соответствии с изменениями высоты горизонтального слоя элементов, т.е. вертикальный шаг сетки – неравномерный. В момент кристаллизации металла внутри элемента шаг сетки, соответствующий данному элементу, фиксировался в качестве начальной высоты данного элемента. Относительную деформацию элемента определяли с

учетом изгиба заготовки и порядковых номеров элемента в плоскости изгиба по всей длине слитка. Нормальное напряжение элемента рассчитывали следующим образом:

$$\sigma = \begin{cases} E_1(T)(\varepsilon - \varepsilon_p - \varepsilon_{p-}), & \text{если } \varepsilon \geq \varepsilon_{u-} + \varepsilon_p + \varepsilon_{p-} \text{ и } \varepsilon \leq \varepsilon_u + \varepsilon_p + \varepsilon_{p-}, \\ E_1(T)\varepsilon_u(T) + E_2(T)(\varepsilon - \varepsilon_u(T) - \varepsilon_{p-}), & \text{если } \varepsilon > \varepsilon_u + \varepsilon_p + \varepsilon_{p-}, \\ E_1(T)\varepsilon_{u-}(T) + E_{2-}(T)(\varepsilon - \varepsilon_{u-}(T) - \varepsilon_p), & \text{если } \varepsilon < \varepsilon_{u-} + \varepsilon_p + \varepsilon_{p-}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $E_1(T)$  – модуль Юнга для упругой деформации;  $E_2(T)$  – модуль Юнга для пластической деформации при растяжении;  $E_{2-}(T)$  – модуль Юнга для пластической деформации при сжатии;  $\varepsilon_u(T)$  – относительная пластическая деформация элемента при растяжении;  $\varepsilon_{u-}(T)$  – относительная пластическая деформация элемента при сжатии;  $\varepsilon_p$  – относительная пластическая деформация элемента при растяжении;  $\varepsilon_{p-}$  – относительная пластическая деформация элемента при сжатии. Накопление пластических деформаций проводили по правилам:

$$\varepsilon_p = (\varepsilon - \varepsilon_{p-} - \varepsilon_u(T)) \left( 1 - \frac{E_2(T)}{E_1(T)} \right), \quad (2)$$

$$\varepsilon_{p-} = (\varepsilon - \varepsilon_p - \varepsilon_{u-}(T)) \left( 1 - \frac{E_{2-}(T)}{E_1(T)} \right). \quad (3)$$

Таким образом, моделирование напряжений сводится к перерасчету вертикального шага конечно-разностной сетки по напряжениям и накоплению пластических деформаций по формулам (2), (3). При компьютерном моделировании использовали теплофизические данные по стали 18ХГТ и слиток размером 250×300 мм.

На рис. 1 показан фрагмент схемы плоскофакельного охлаждения, использованного при проведении вычислительных экспериментов. Пространственные размеры ЗВО слитка были взяты на Белорусском металлургическом заводе и соответствовали реально действующей МНЛЗ-3. Как видно из рисунка, структура ЗВО характеризуется чередованием плоских факелов, охлаждающих поверхность слитка, и роликов, вытягивающих слиток. При моделировании были взяты слиток размером 250×300 мм и сталь 18ХГТ. Для этой стали использовали температуру заливки 1550°С при скорости движения слитка 0,71 м/мин. Все расчеты напряжений были проведены с помощью специально разработанного модуля «ПроНРС-2», позволяющего рассчитывать продольные напряжения. Для анализа напряжений было выбрано несколько наиболее характерных плоскостей. Поперечное сечение слитка характеризовалось направлениями  $X$  и  $Z$ . Направление движения слитка характеризовалось значениями  $Y$ . В качестве анализируемых были выбраны три продольных сечения, которые находились в центральной плоскости слитка ( $Z=0,15$  м), на плоскости вблизи поверхности слитка ( $Z=0,005$  м) и в промежуточной плоскости при  $Z=0,02$  м. При анализе напряжений, возникающих по длине слитка, использовали направления  $X_1, \dots, X_n$ , где  $X_n$  – координата  $n$ -й точки по направлению  $X_n$ .

На рис. 2 представлены результаты расчета напряжений по длине слитка в точках, находящихся на различных расстояниях от поверхности.

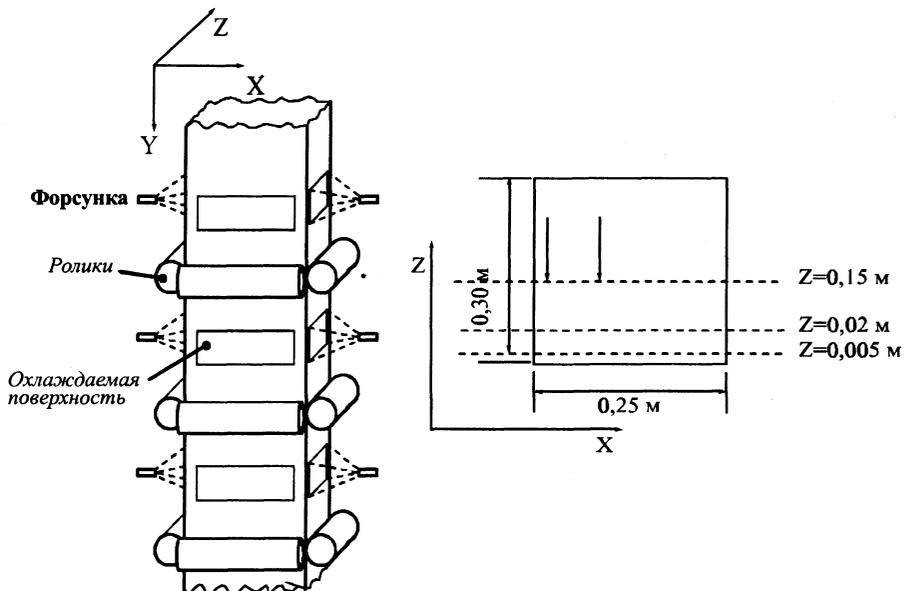


Рис. 1. Расчетная схема плоскофакельного водяного охлаждения на участке зоны вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок

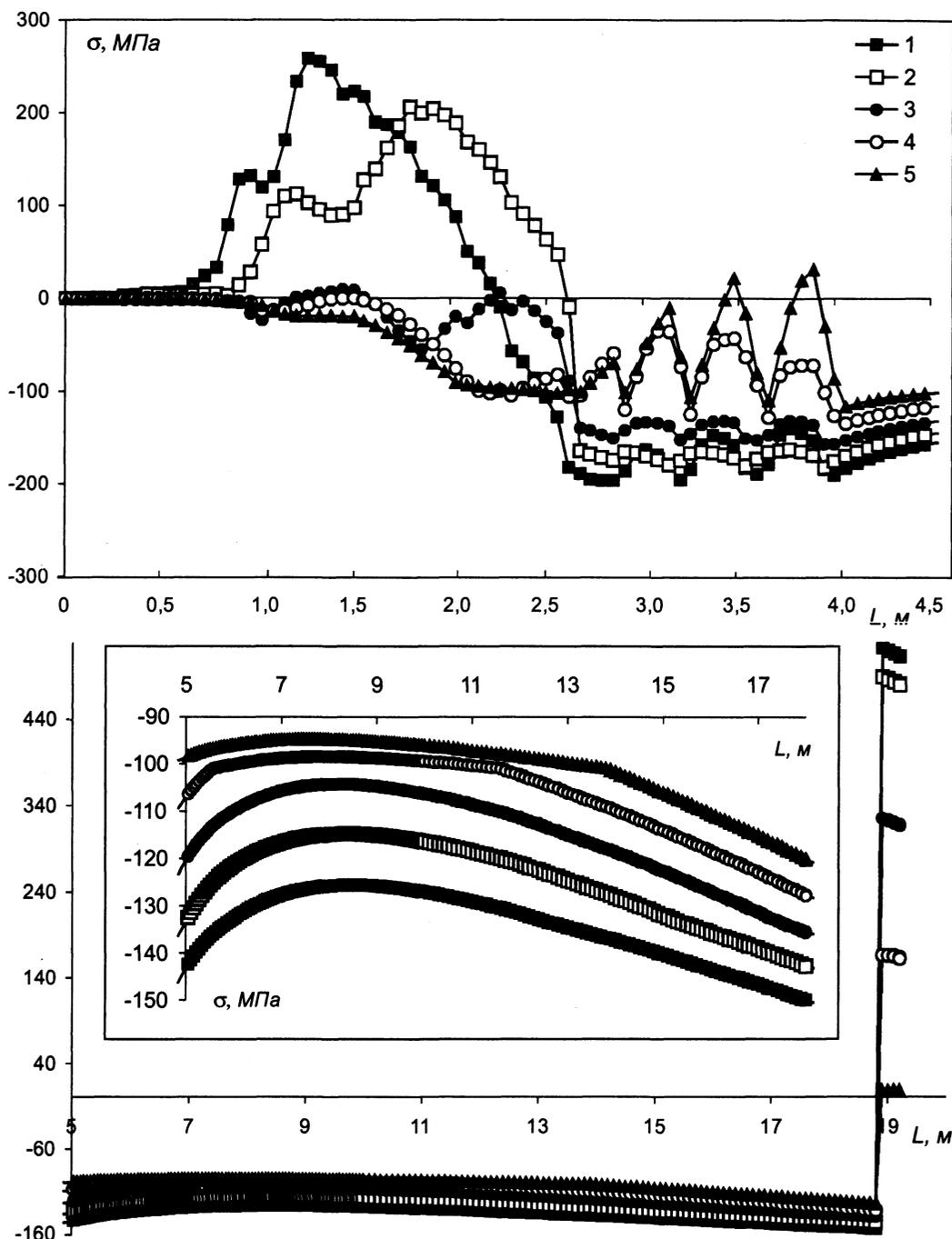


Рис. 2. Распределение напряжений в продольном сечении ( $Z=0,005$  м) слитка размером 250x300 мм для различных направлений: 1 –  $X=0,005$  м; 2 – 0,015; 3 – 0,025; 4 – 0,035; 5 – 0,045 м

Как видно из рисунка, в зоне вторичного охлаждения, соответствующей интервалу от  $0,8 \leq L \leq 4$  м напряжения изменяются нелинейно. Причем для каждой точки  $X_n$  слитка имеется свой закон изменения напряжений. Для точек  $X=0,005$  и  $0,015$  м в интервале  $0,8 \leq L \leq 2,5$  м напряжения являются растягивающими. При дальнейшем движении слитка приблизительно при  $L \approx 2,5$  м напряжения переходят в сжимающие. Для точек  $X=0,025, 0,035, 0,045$  м напряжения практически во всем анализируемом интервале движения слитка носят сжимающий характер, причем изменение напряжений в ЗВО носит колебательный характер, что хорошо видно для точек  $X=0,045$  м. В зоне кристаллизатора  $0 \leq L \leq 0,8$  м значения напряжений для всех точек одинаковы и близки к нулю. Следует отметить, что такой сложный характер напряжений по переходам «растяжение  $\rightleftharpoons$  сжатие» наблюдается для точек, находящихся вблизи угла слитка. Дальнейшее движение слитка характеризуется нелинейным уменьшением сжимающих напряжений приблизительно до 9–11 м и дальнейшим их незначительным увеличением. В районе механического разгиба слитка  $L \approx 19,0$  м наблюдается всплеск напряжений и переход их из сжимающих в растягивающие. Как видно из рис. 2, чем дальше точка  $X_n$  находится от поверхности, тем меньше в ней напряжения.

На рис. 3 показано распределение напряжений в продольном сечении  $Z=0,02$  для точек, находящихся на различных расстояниях от поверхности. В точках  $X=0,015, 0,025, 0,035$  и  $0,045$  м при движении слитка в ЗВО первоначально возникают растягивающие напряжения, которые в районе 2–3 м переходят в сжимающие напряжения. Изменения напряжений носят колебательный характер. Для точки, ближайшей к центру слитка  $X=0,045$  м, переход растягивающих напряжений в сжимающие более плавный по сравнению с напряжениями в других представленных точках. Причем для точки  $X=0,045$  м интервалы сжимающих напряжений незначительны (порядка 0,5 м) и дальнейший участок  $3,5 \leq L \leq 7$  м характеризуется растягивающими напряжениями. Из представленных расчетов можно сделать вывод, что чем ближе точка к центру слитка, тем дальше по длине находится переход ее напряжений из растягивающих в сжимающие. Из рисунка видно, что на участке  $11 \leq L \leq 19$  м напряжения во всех анализируемых точках носят сжимающий характер. Причем вблизи точки разгиба, так же как и для сечения  $Z=0,005$  м, имеется переход сжимающих напряжений в растягивающие.

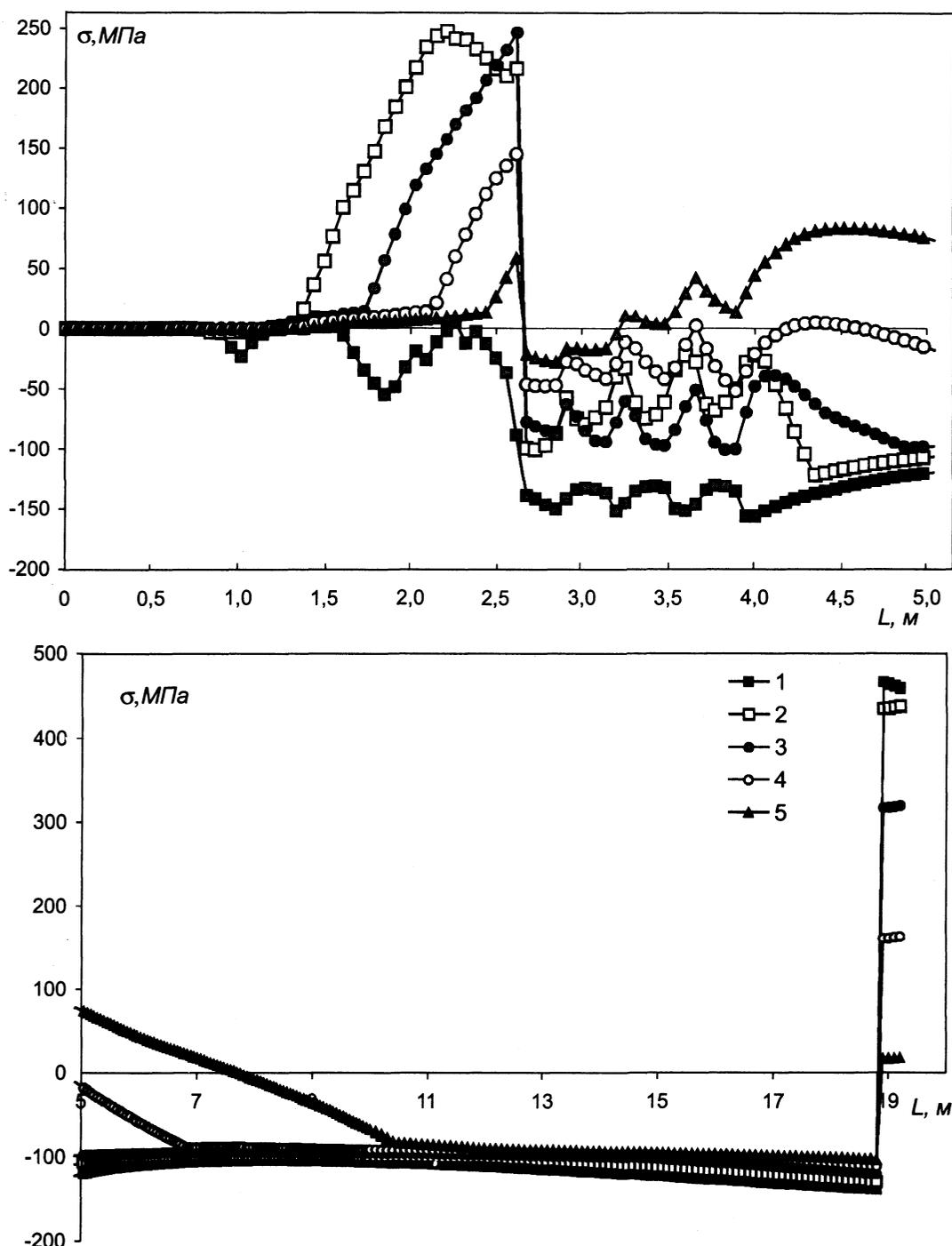


Рис. 3. Распределение напряжений в продольном сечении ( $Z=0,02$  м) слитка размером 250x300 мм для различных направлений: 1 –  $X=0,005$  м; 2 – 0,015; 3 – 0,025; 4 – 0,035; 5 – 0,045 м

На рис. 4 представлено распределение напряжений в центральном продольном сечении слитка. Как видно из рисунка, чем ближе точка к поверхности слитка, тем более ярко выражены в ней сжимающие напряжения. Для интервала  $2,5 \leq L \leq 4,0$  м напряжения изменяются по колебательному закону, что связано с чередованием зон водяного и воздушного охлаждения. Для точки, расположенной ближе к центру слитка  $X=0,045$  м, напряжения носят растягивающий характер, что имело место при анализе сечений  $Z=0,005$  и  $0,02$  м.

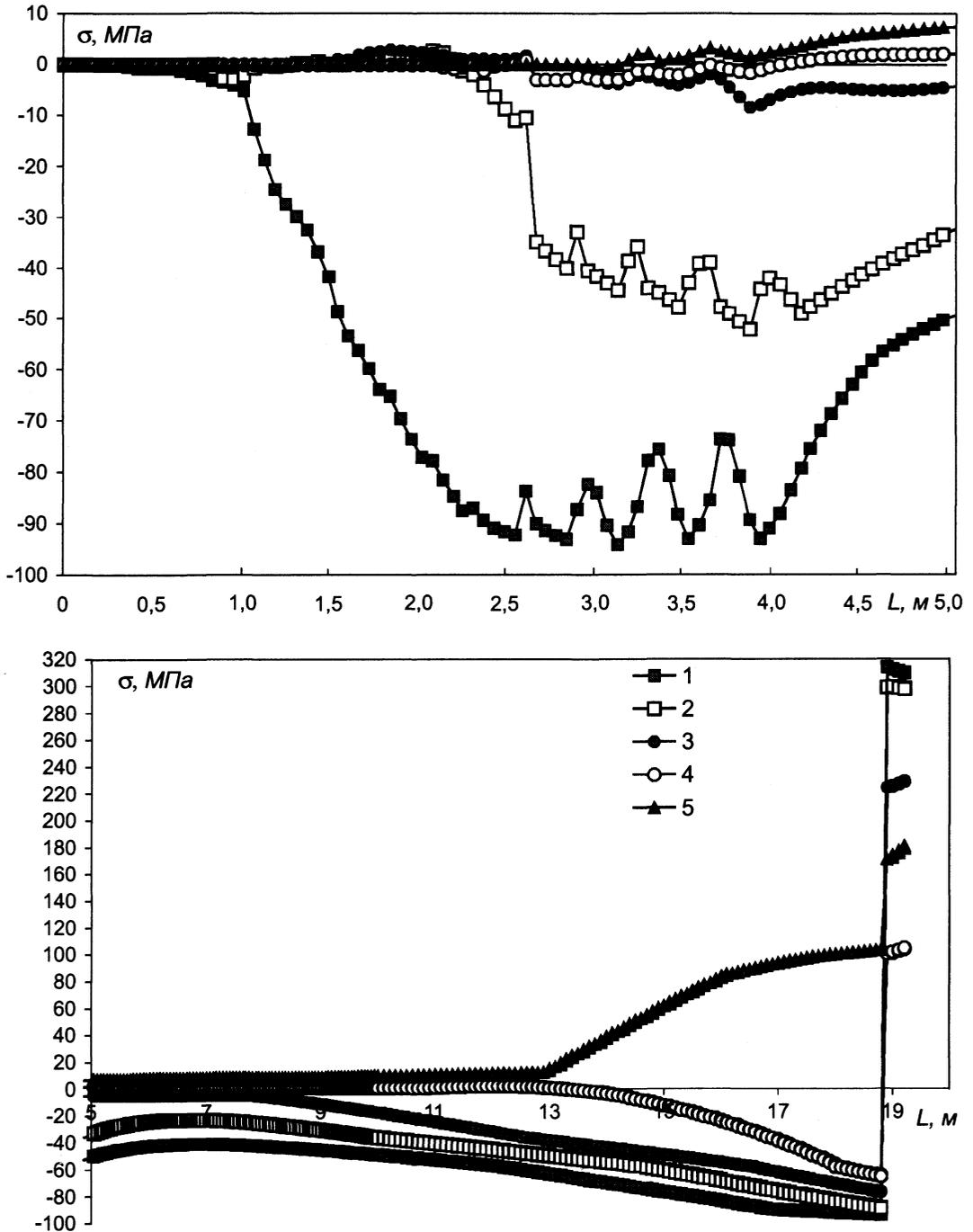


Рис. 4. Распределение напряжений в продольном сечении ( $Z=0,15$  м) слитка размером  $250 \times 300$  мм для различных направлений: 1 –  $X=0,005$  м; 2 –  $0,015$ ; 3 –  $0,025$ ; 4 –  $0,035$ ; 5 –  $0,045$  м

На рис. 5 показано распределение напряжений в поперечном сечении слитка, находящемся в первой ЗВО ( $Y=1,08$  м). Как видно из рисунка, вблизи угла слитка при  $Z=0,005$  м продольные напряжения первоначально являются растягивающими, затем переходят в сжимающие ближе к центру слитка. Чем дальше анализируемая точка находится от поверхности, тем менее ярко выражен переход растягивающих в сжимающие напряжения.

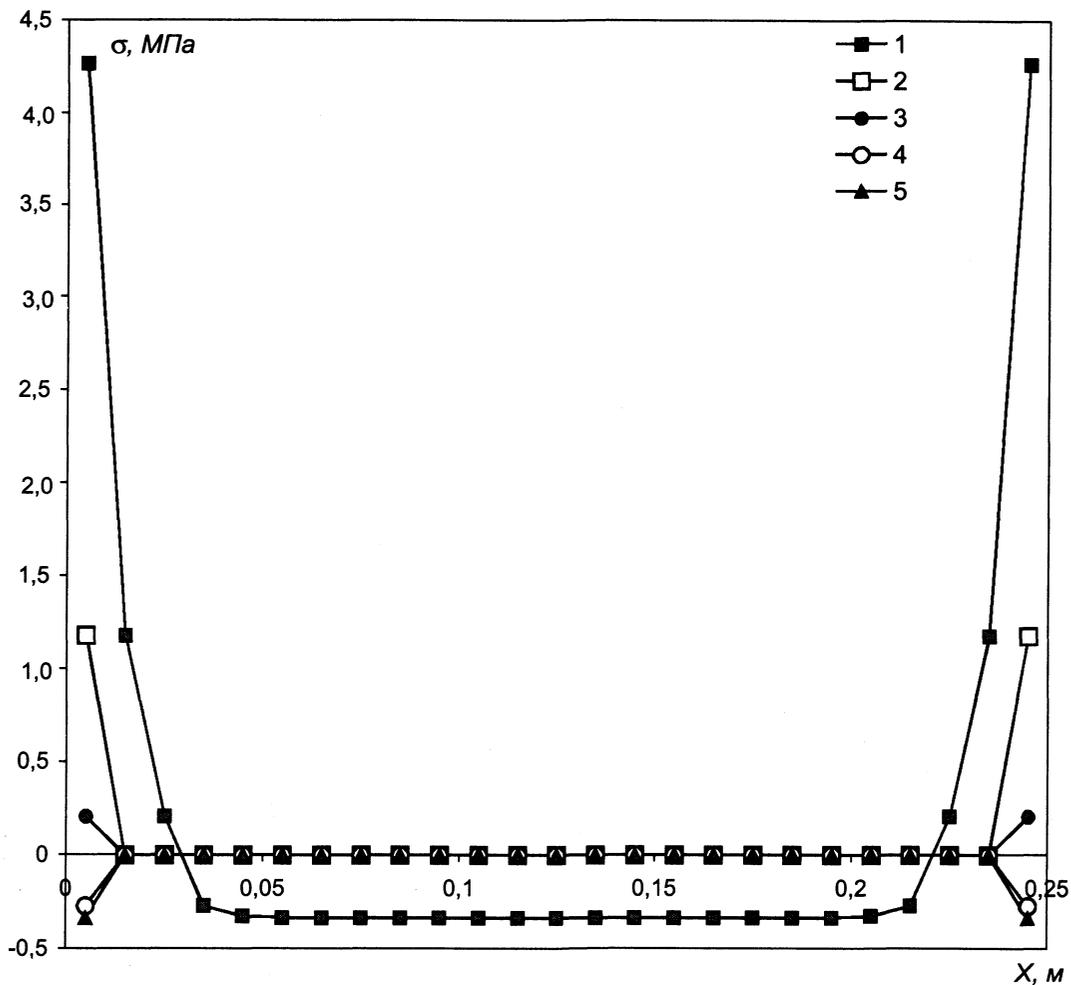


Рис. 5. Распределение напряжений в поперечном сечении ( $Y=1,08$  м) слитка размером 250x300 мм для различных направлений: 1 –  $Z=0,005$  м; 2 – 0,015; 3 – 0,025; 4 – 0,035; 5 – 0,155 м

На рис. 6 приведено распределение напряжений в поперечном сечении, находящемся во второй зоне вторичного охлаждения ( $Y=2,05$  м). Распределение напряжений для этого сечения подобно распределению напряжений для сечения  $Y=1,08$  м, однако значения напряжений по величине, особенно для точки  $Z=0,005$  м, отличаются в десятки раз.

На рис. 7 представлено распределение напряжений для поперечного сечения, находящегося в третьей ЗВО ( $Y=3,03$  м). Как видно из рисунка, на краях слитка практически для всех точек  $Z_n$  наблюдается первоначальный рост напряжений, а затем при движении к середине выделенной плоскости их уменьшение до нуля. Причем для крайней точки  $Z=0,005$  м характерен переход сжимающих напряжений в растягивающие и обратно в сжимающие. Для остальных анализируемых точек растягивающие напряжения стремятся к нулю при движении к середине анализируемого сечения. На рисунке четко прослеживается симметрия в изменении напряжений. Следует отметить, что термические напряжения рассчитывали в условиях симметричного водяного охлаждения граней слитка.

На рис. 8 показано распределение напряжений в поперечном сечении за зоной вторичного охлаждения ( $Y=6,01$  м). Как видно из рисунка, характер напряжений в сравнении с напряжениями сечения  $Y=3,03$  м изменился. Видна асимметрия в изменении напряжений, что связано с изгибом слитка в интервале  $L \approx 3-4$  м. В данном случае на термические напряжения в слитке накладываются механические напряжения. Для крайних точек  $Z=0,005$  и  $0,015$  м наблюдается уменьшение сжимающих напряжений практически на всем выделенном сечении. Для точки  $Z=0,015$  м имеется всплеск напряжений, что связано с механическим изгибом.

На рис. 9 представлено распределение напряжений в поперечном сечении  $Y=10$  м. Асимметрия напряжений в точке  $Z=0,025$  м сохраняется, а для точки  $Z=0,015$  м исчезает. По-видимому, при движении слитка происходит передача механической энергии от краев слитка к его середине. Причем этот переход протекает ступенчато от одного слоя ко второму слою.

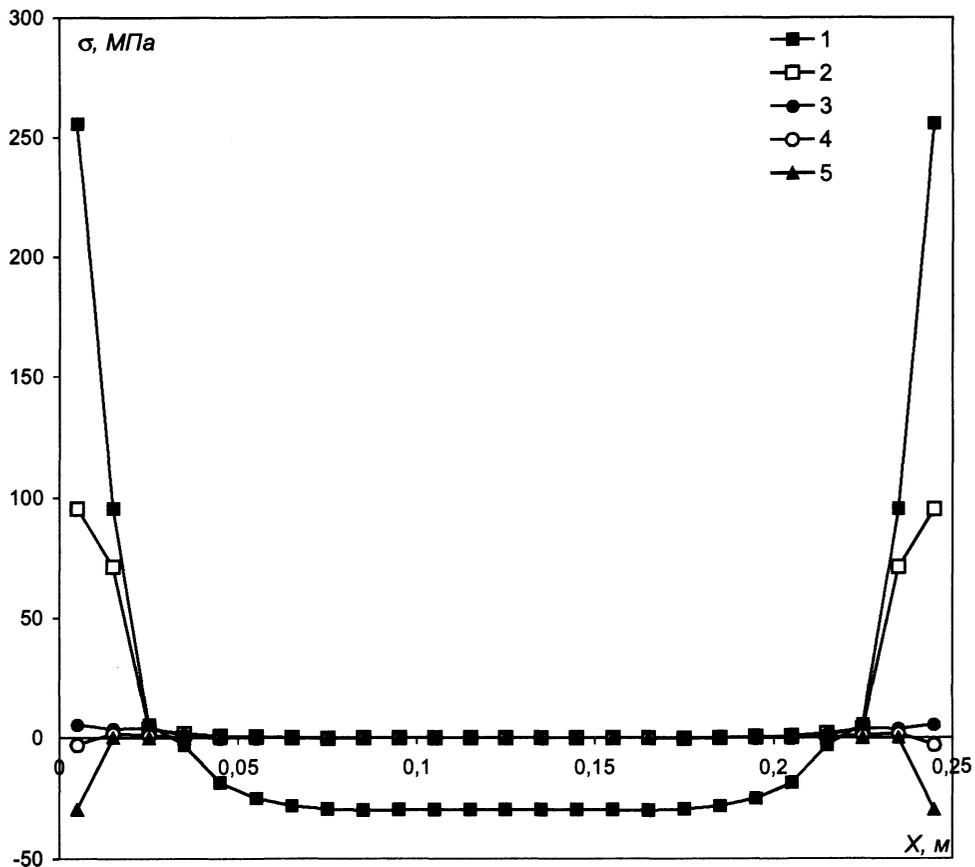


Рис. 6. Распределение напряжений в поперечном сечении ( $Y=2,05$  м) слитка размером 250x300 мм для различных направлений: 1 –  $Z=0,005$  м; 2 – 0,015; 3 – 0,025; 4 – 0,035; 5 – 0,155 м

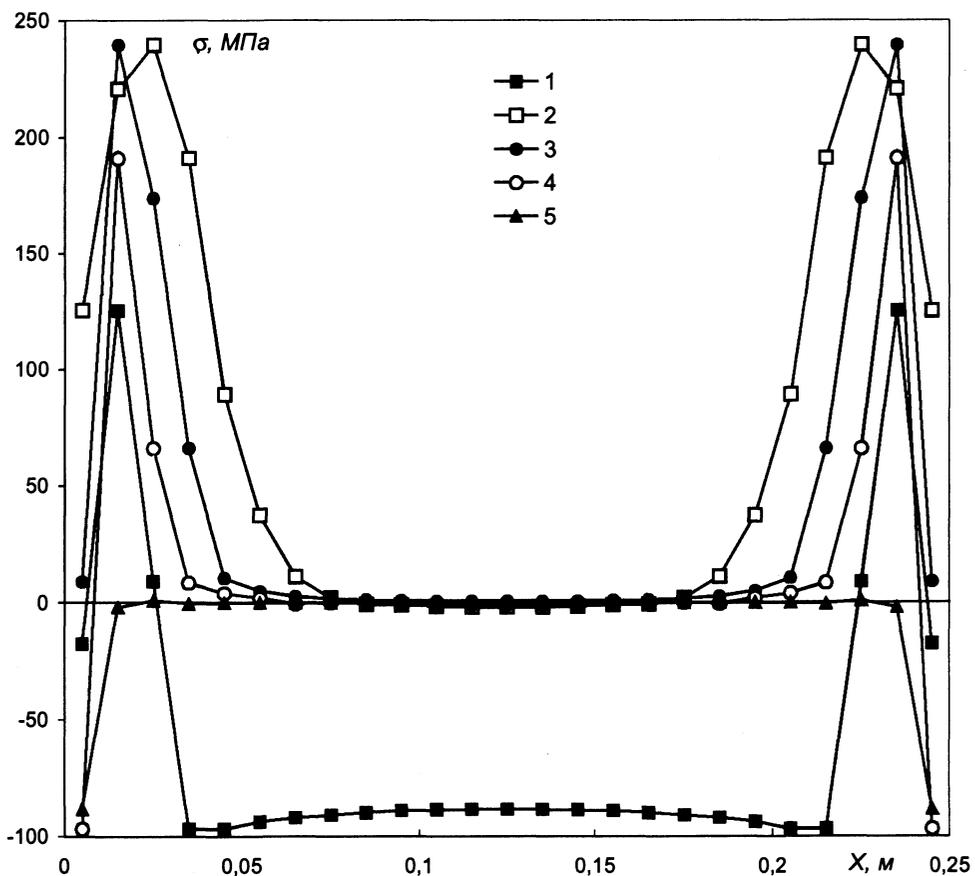


Рис. 7. Распределение напряжений в поперечном сечении ( $Y=3,03$  м) слитка размером 250x300 мм для различных направлений: 1 –  $Z=0,005$  м; 2 – 0,015; 3 – 0,025; 4 – 0,035; 5 – 0,155 м

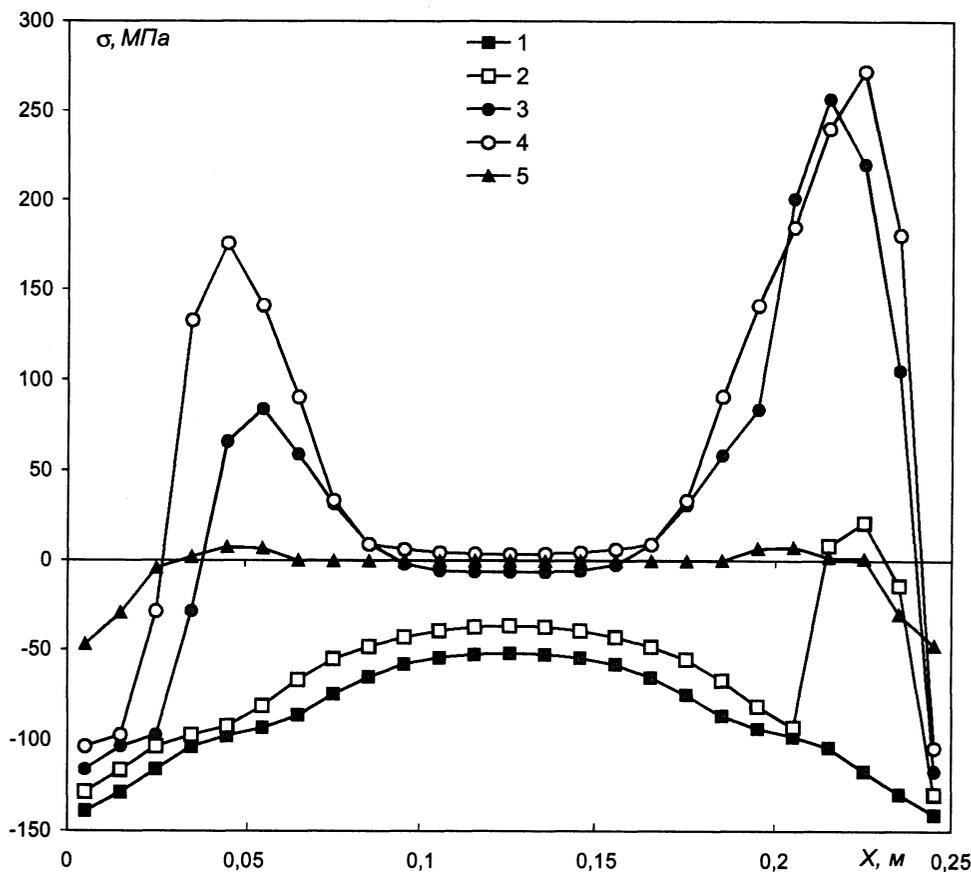


Рис. 8. Распределение напряжений в поперечном сечении ( $Y=6,01$  м) слитка размером 250x300 мм для различных направлений: 1 -  $Z=0,005$  м; 2 - 0,015; 3 - 0,025; 4 - 0,035; 5 - 0,155 м

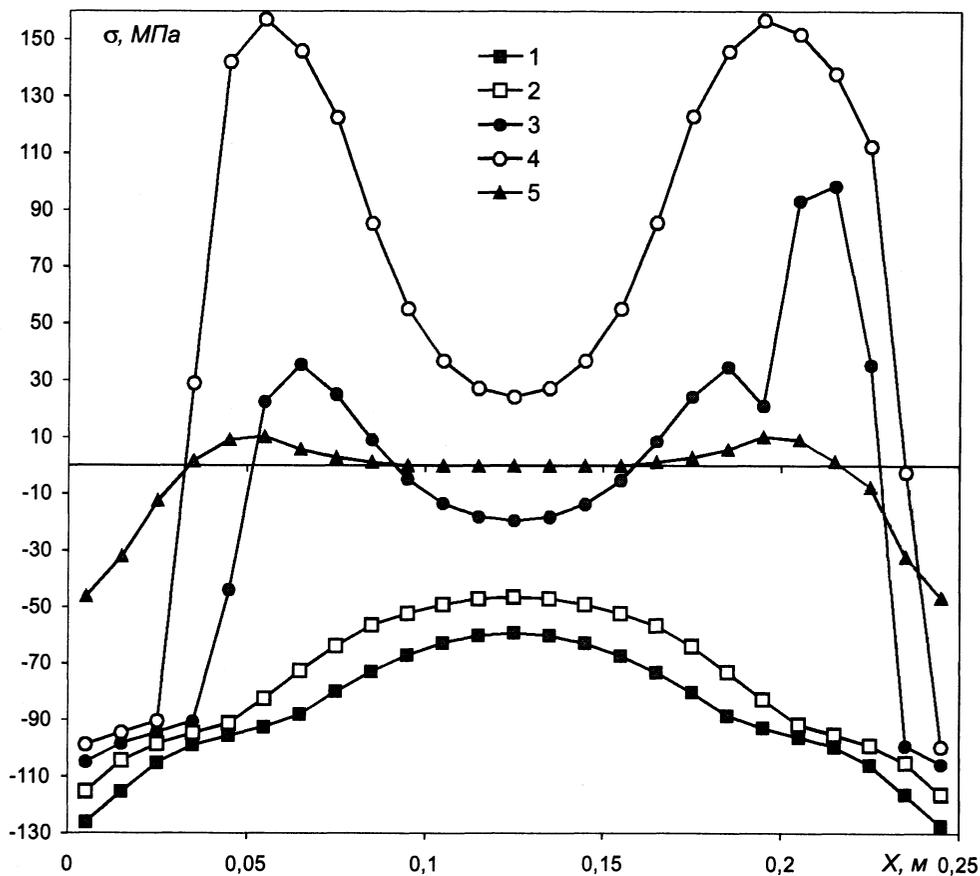


Рис. 9. Распределение напряжений в поперечном сечении ( $Y=10$  м) слитка размером 250x300 мм для различных направлений: 1 -  $Z=0,005$  м; 2 - 0,015; 3 - 0,025; 4 - 0,035; 5 - 0,155 м

Таким образом, проведенные компьютерные исследования показали, что при плоскофакельном форсуночном охлаждении в слитке наблюдается сложнейшая картина изменения напряжений как по длине, так и в поперечном сечении. Величина напряжений может меняться в широком интервале и достигать в отдельных точках значений порядка 250 МПа. Однако это не означает, что обязательно в этой точке могут возникнуть трещины, так как вблизи этой точки может находиться жидкий металл, который «залечивает» трещину. С учетом изгиба в различных точках слитка выделенного поперечного сечения может наблюдаться как симметрия, так и асимметрия сжимающих и растягивающих напряжений. По длине слитка наблюдается переход растягивающих напряжений в сжимающие и, наоборот, в зависимости от пространственного расположения точки. Это еще раз свидетельствует о том, что игнорирование в расчетах напряжений пространственных размеров слитка, которое широко применяется в двумерных и одномерных моделях, вуалирует истинную картину полей напряженного состояния слитка. Поэтому глубокий анализ напряжений слитка невозможен без решения трехмерных задач термонапряженного состояния.

### Литература

1. Евтеев Д.П., Колыбалов И.Н. Непрерывное литье стали. М.: Metallurgy, 1984.
2. Шмрга Л. Затвердевание и кристаллизация стальных слитков / Пер. с чешск.; Под ред. В.И. Кашина. М.: Metallurgy, 1985.
3. 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.
4. Чичко А.Н. Компьютерные системы моделирования физических процессов // Вестн. БНТУ. 2003. № 2. С. 42–48.
5. Чичко А.Н., Кукуй Д.М., Соболев В.Ф. и др. Компьютерная система «ПроНПС» и трехмерное моделирование распределения температур, напряжений и углерода в процессе непрерывной разливки стали // Литье и металлургия. 2002. №3. С. 21–27.
6. Чичко А.Н., Яцкевич Ю.В., Соболев В.Ф. Новый метод выбора размеров питателей литниковой системы на основе трехмерного компьютерного моделирования // Докл. НАН Беларуси. 1998. Т.43, № 1. С. 130–133.
7. Чичко А.Н., Яцкевич Ю.В. Трехмерное компьютерное моделирование охлаждения отливки и выбор питателя литниковой системы на основе уравнения теплопроводности // Инж.-физ. журн. 1999. Т.72. С. 797–801.
8. Чичко О.И., Соболев В.Ф., Анисович Г.А., Чичко А.Н. О методах компьютерного анализа напряжений и деформаций трехмерной детали, подвергнутой термической обработке // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2002. №4. С. 24–29.
9. Чичко А.Н., Дроздов Е.А. Компьютерное моделирование термоупругости сплавов, кристаллизующихся в трехмерных пространственных структурах // Докл. НАН Беларусі. 2002. Т.46, №1. С. 115–119.