



The results of computer calculations of the stresses, generated in outside layer of ingot of steel 20 of circular section with diameter 300 mm, in application to one of the industrial technological schemas of RUP "BMZ", are presented. The segments of compressive and tensile stresses formation along the length of ingot are determined and the principal possibility of production of continuously cast slug of circular section at circular-torch spray cooling 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 519:669.27

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ В СЛИТКЕ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ, КРИСТАЛЛИЗУЮЩЕМСЯ ПРИ КРУГЛОФАКЕЛЬНОМ ВТОРИЧНОМ ОХЛАЖДЕНИИ

Наиболее распространенной пространственной конфигурацией слитка при получении заготовок методом непрерывного литья является параллелепипед, как правило, с сечением прямоугольника 250x300 и 300x400 мм. В то же время при использовании прямоугольных сечений на МНЛЗ на углах слитка могут формироваться значительные температурные напряжения, которые влияют на качество получаемой заготовки. Причина формирования этих напряжений на углах связана с неравномерным водяным охлаждением при движении слитка от кристаллизатора в зону тянущих роликов. Естественно, что уход от «угловой» структуры поперечного сечения к «круглому» может существенно изменить процесс формирования термонапряженного состояния и повлиять на качество получаемой заготовки. Особенно актуальна эта задача в связи с разворачивающейся на РУП «БМЗ» подготовкой производства трубных заготовок из низкоуглеродистых марок сталей типа сталь 20.

Целью настоящей работы является компьютерное моделирование и расчет процесса кристаллизации слитков круглого сечения в условиях существующей схемы МНЛЗ-3 для выработки новых технологических решений в получении трубных заготовок.

При проведении расчетов распределения температур и напряжений в круглом слитке был использован радиус 150 мм. В качестве материала слитка выбрана низкоуглеродистая сталь 20. В основу расчетов процессов кристаллизации положена геометрическая схема МНЛЗ-3, используемая на РУП «БМЗ». Упрощенная схема кристаллизующегося слитка, использованная в расчетах, показана на рис. 1. На рис. 2 представлены фрагменты схемы процесса кристаллизации в верхней части МНЛЗ и по всей длине слитка, а также пространственное распределение форсунок в ЗВО.

В качестве исходных данных для компьютерных расчетов для стали 20 были взяты значения по параметрам технологического процесса разлива стали в применении к МНЛЗ-3: температуры разлива, скорость разлива, расходы воды на различные участки зоны вторичного охлаждения, уровень расплава в кристаллизаторе и характеристики его изменения (данные взяты с учетом реальных плавок близких марок сталей). Для проведения расчетов по напряжениям были отобраны из литературных экспериментальных данных зависимости от температуры для теплопроводности, модуля Юнга, модуля сдвига, коэффициента линейного расширения, плотности, теплоты кристаллизации. На основе практических данных

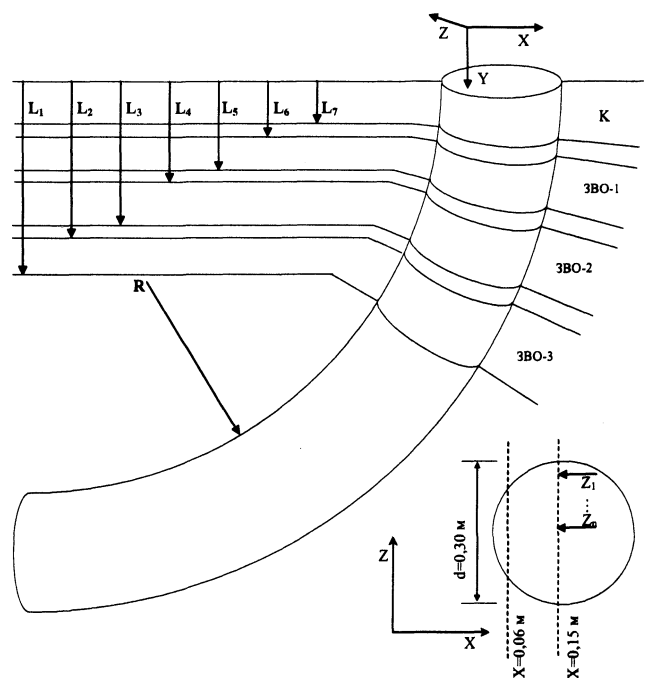


Рис.1. Схема кристаллизующегося слитка с поперечным сечением диаметром 300 мм в машине непрерывного литья заготовок с кристаллизатором (К) и зонами вторичного охлаждения (ЗВО-1, ЗВО-2, ЗВО-3):  $L_1 = 3,839$  м;  $L_2 = 2,181$  м;  $L_3 = 1,913$  м;  $L_4 = 1,317$  м;  $L_5 = 1,170$  м;  $L_6 = 0,876$  м;  $L_7 = 0,800$  м;  $R = 12$  м

РУП «БМЗ» были выбраны температура разливки, температура ликвидуса, скорость разливки, положение уровня металла в кристаллизаторе, количество воды, расходуемое на каждую зону вторичного охлаждения.

Для анализа результатов расчетов в слитке было выделено несколько плоскостей (направлений), в различных сечениях слитка для которых, как показали предварительные исследования, наиболее удобно анализировать характер напряжений и температур. Такими плоскостями являются  $X=0,06$  м (край слитка) и  $X=0,15$  м (центральная плоскость слитка). На рис. 1 представлены выделенные для анализа плоскости в пространстве кристаллизующегося слитка.

В качестве математической модели для расчета температур использовали трехмерное дифференциальное уравнение теплопроводности [1–3]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{c(T)\rho} \left( F_x + F_y + F_z + Q_{кр} \frac{\partial \rho_{sol}}{\partial \tau} \right), \quad (1)$$

где

$$F_i = \begin{cases} \frac{\partial \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial i} \right)}{\partial i}, & \text{если } R(x, y, z) \in \Omega_M, \\ \frac{\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial i} - k(T - T_{cp})}{\partial i}, & \text{если } R(x, y, z) \in \Omega_{M-cp}; \end{cases} \quad (2)$$

$T$  – температура в точках  $x, y, z$  слитка;  $T_{cp}$  – температура внешней среды (постоянная величина – 25°C);  $\tau_i$  – время;  $\lambda(T)$  – коэффициент теплопроводности материала при температуре  $T$ ;  $c(T)$  – удельная теплоемкость материала при температуре  $T$ ;  $\rho = \rho_{sol} + \rho_{liq}$  – приведенная плотность стали;  $\rho_{liq}$  – плотность жидкой фазы;  $\rho_{sol}$  – плотность твердой фазы;  $x, y, z$  – декартовы координаты;  $Q_{кр}$  – удельная теплота кристаллизации металла;  $k$  – коэффициент теплоотдачи поверхности металла в охлаждающую среду;  $\Omega_M$  – пространство точек металла;  $\Omega_{M-cp}$  – пространство точек границы металл–среда.

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

$$\Delta \rho_{sol}(x, y, z, \tau) = \rho_{sol}(T_{liq}(C_{liq}) - T) \times c(T) / Q_{кр}, \quad (3)$$

$$\rho_{sol}(x, y, z, \tau + \Delta \tau) = \rho_{sol}(x, y, z, \tau) + \Delta \rho_{sol}(x, y, z, \tau), \quad (4)$$

$$\rho_{liq}(x, y, z, \tau + \Delta \tau) = \rho_{liq}(x, y, z, \tau) - \Delta \rho_{sol}(x, y, z, \tau), \quad (5)$$

где  $\rho_{sol}$  – плотность твердой фазы;  $\rho_{liq}$  – плотность жидкой фазы;

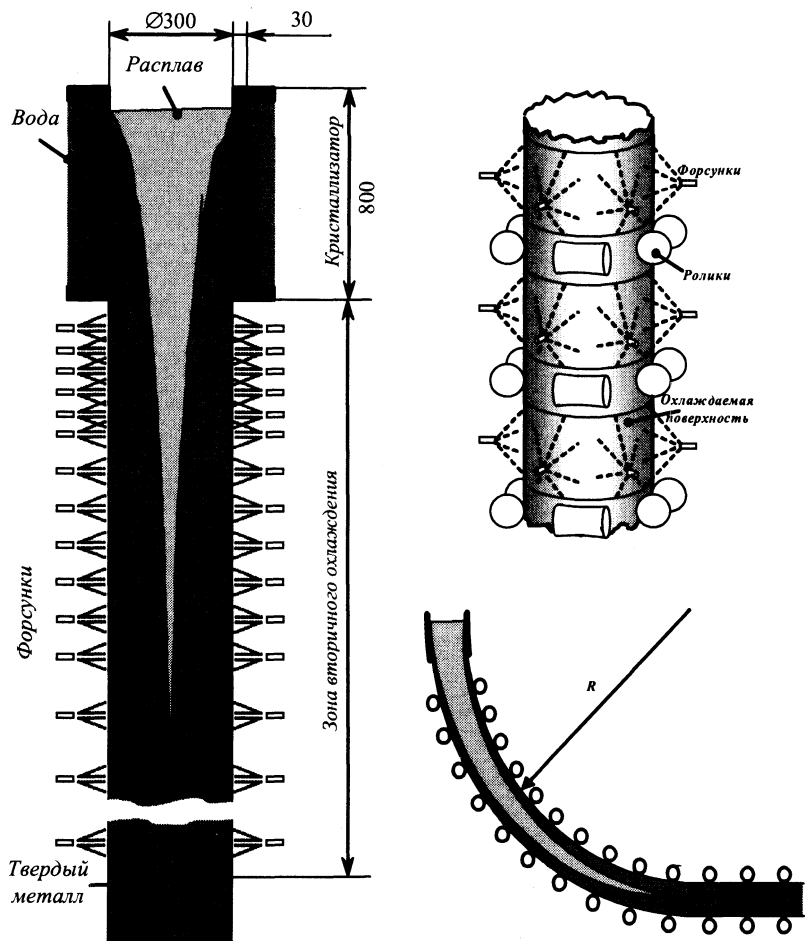


Рис. 2. Схематическое изображение процесса кристаллизации в верхней части МНЛЗ и по всей длине слитка, а также пространственное распределение форсунок в ЗВО в машине непрерывного литья заготовок с кристаллизатором (К) и роликовой секцией (ЗВО-1, ЗВО-2, ЗВО-3)

$T_{liq}(C_{liq})$  – температура ликвидуса, зависящая от концентрации углерода в жидкой фазе.

На основе представленного математического формализма была разработана программа для расчета температурного и напряженного поля в пространстве кристаллизующегося слитка. С помощью этой программы были проведены расчеты кристаллизации слитка диаметром 300 мм из стали 20, которые будут рассмотрены ниже.

В компьютерных расчетах зона вторичного охлаждения разбита на три секции, в каждой из которых имеется свой расход воды, характеризуемый различным числом форсунок. Проходя через ЗВО, движущийся слиток начинает деформироваться и в дальнейшем перемещается по дуге, близкой к  $\frac{1}{4}$  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 расчета полей напряжений использовали математическую модель термонапряженного состояния [4–9]. Для проведения расчетов использовали компьютерную систему, разрабатываемую в Белорусском национальном техническом университете для решения разнообразных проблем металлургического производства.

Ниже представлены результаты моделирования полей напряжений слитка круглого сечения из стали 20 с учетом того, что изгиб слитка начинается при выходе из кристаллизатора (приблизительно 1 м от начала), а разгиб слитка проходит на расстоянии 17 м от начала слитка. При этом радиус изгиба равен 10 м.

На рис. 3 приведены результаты расчета распределения напряжений по длине круглого слитка (сталь 20) диаметром 300 мм в продольном сечении  $X=0,15$  м для различных направлений (интервал изгиба 1–17 м), а на рис. 4, 5 – увеличенное распределение напряжений по длине круглого слитка (сталь 20) диаметром 300 мм в продольном сечении  $X=0,15$  м для различных направлений. Как видно из рисунков, в зоне вторичного охлаждения, соответствующей интервалу от  $0,8 \leq L \leq 4$  м, напряжения изменяются и осциллируют для точек, находящихся близко к поверхности слитка. Причем для каждой точки  $Z_n$  слитка имеется свой закон изменения напряжений. Для точек  $Z = 0,005$  и  $0,025$  м в интервале  $0,8 \leq L \leq 2,5$  м напряжения сильно осциллируют, сопровождаясь переходами растягивающих напряжений в сжимающие. Для точек направлений интервала по координате  $X=0,045–0,145$  м растягивающие напряжения после выхода из ЗВО увеличиваются, переходя в экстремум, затем уменьшаются, переходя для некоторых точек в сжимающие. В зоне кристаллизатора  $0 \leq L \leq 0,8$  м значения напряжений для всех точек 1–8 (рис. 4, 5) одинаковые и близки к нулю. Следует отметить, что такой сложный характер напряжений по переходам «растяжение  $\rightleftharpoons$

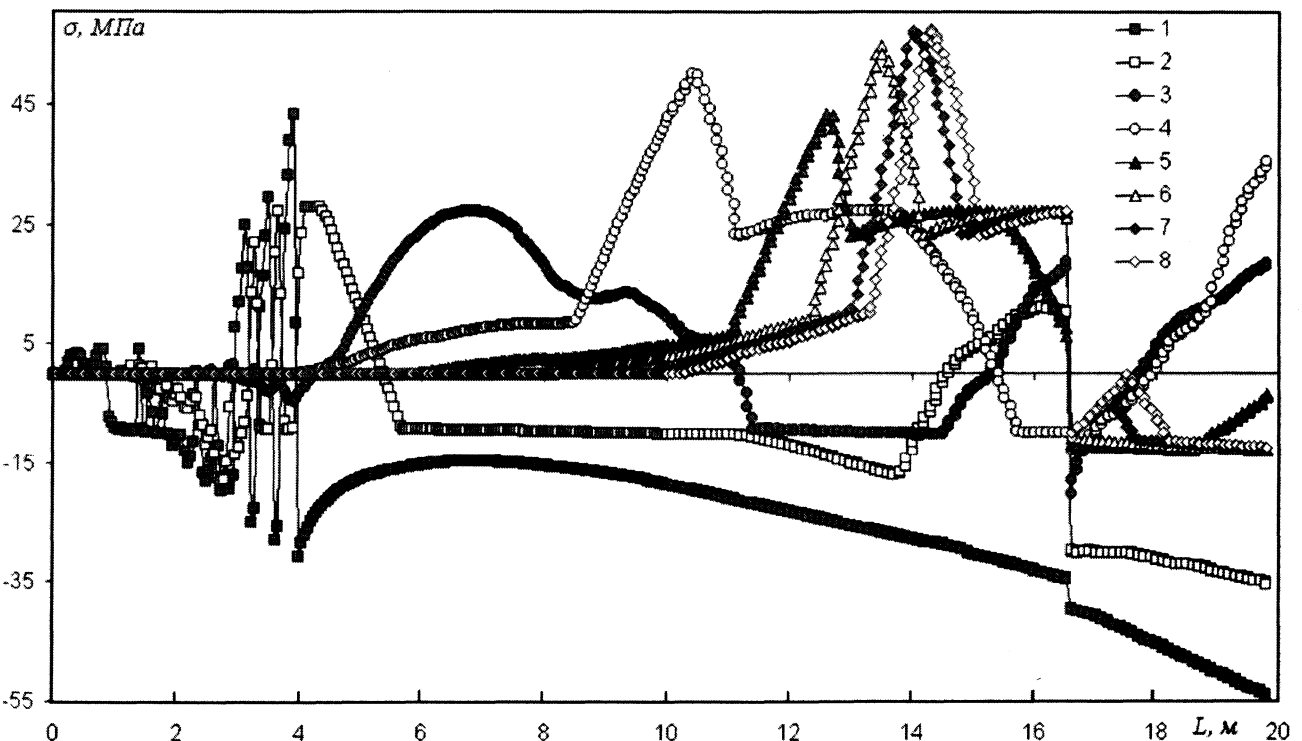


Рис. 3. Распределение напряжений по длине круглого слитка (сталь 20) диаметром 300 мм в продольном сечении  $X=0,15$  м для различных направлений (интервал изгиба слитка 1–17 м): 1 –  $Z=0,005$  м; 2 –  $0,025$ ; 3 –  $0,045$ ; 4 –  $0,065$ ; 5 –  $0,085$ ; 6 –  $0,105$ ; 7 –  $0,125$ ; 8 –  $0,145$  м

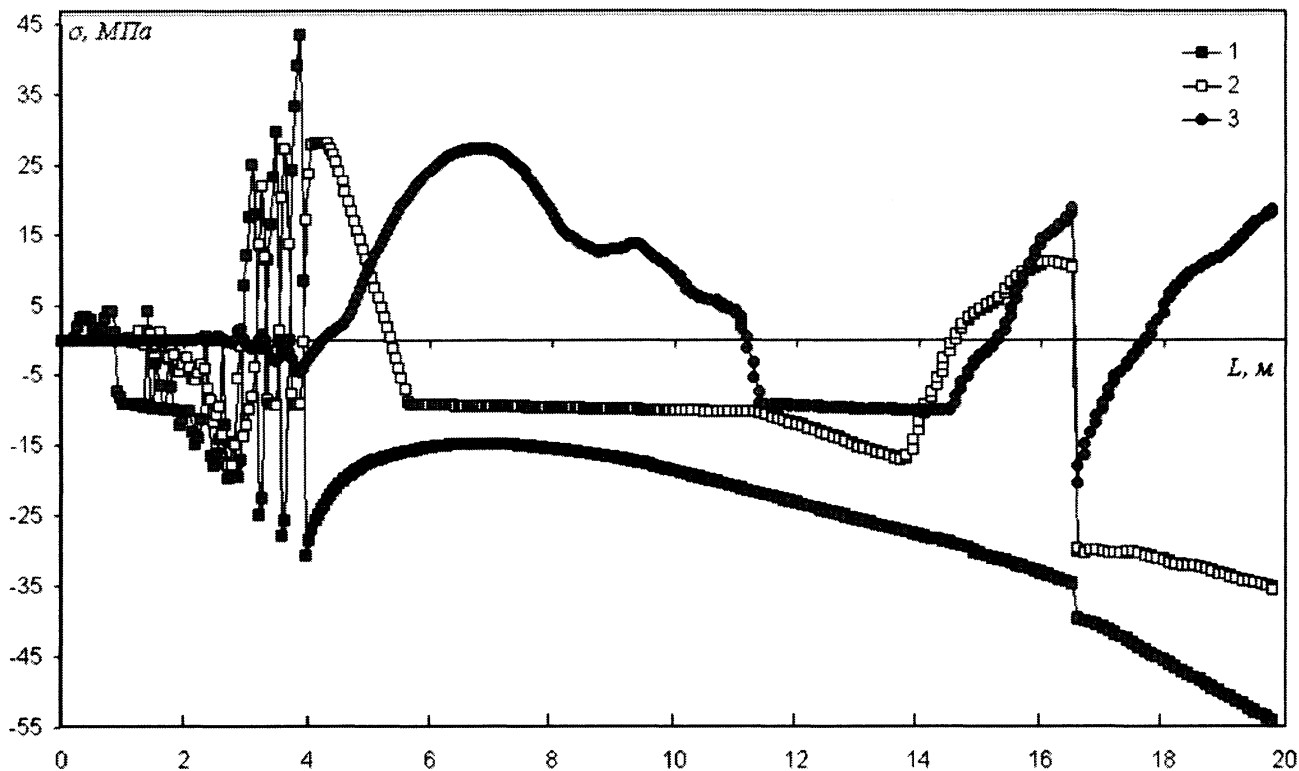


Рис. 4. Увеличенное распределение напряжений по длине круглого слитка (сталь 20) диаметром 300 мм в продольном сечении  $X=0,15$  м для различных направлений (интервал изгиба слитка 1–17 м): 1 –  $Z=0,005$  м; 2 – 0,025; 3 – 0,045 м

сжатие» наблюдается для всех анализируемых точек слитка. В то же время для анализируемых направлений 4–8 в точке 17 м наблюдается резкое изменение знака напряжений, что связано с разгибом слитка. Причем для поверхностных точек слитка сжимающие напряжения являются отрицательными, а для многих внутренних точек 6, 7, 8 наблюдается переход растягивающих напряжений в сжимающие (рис. 5).

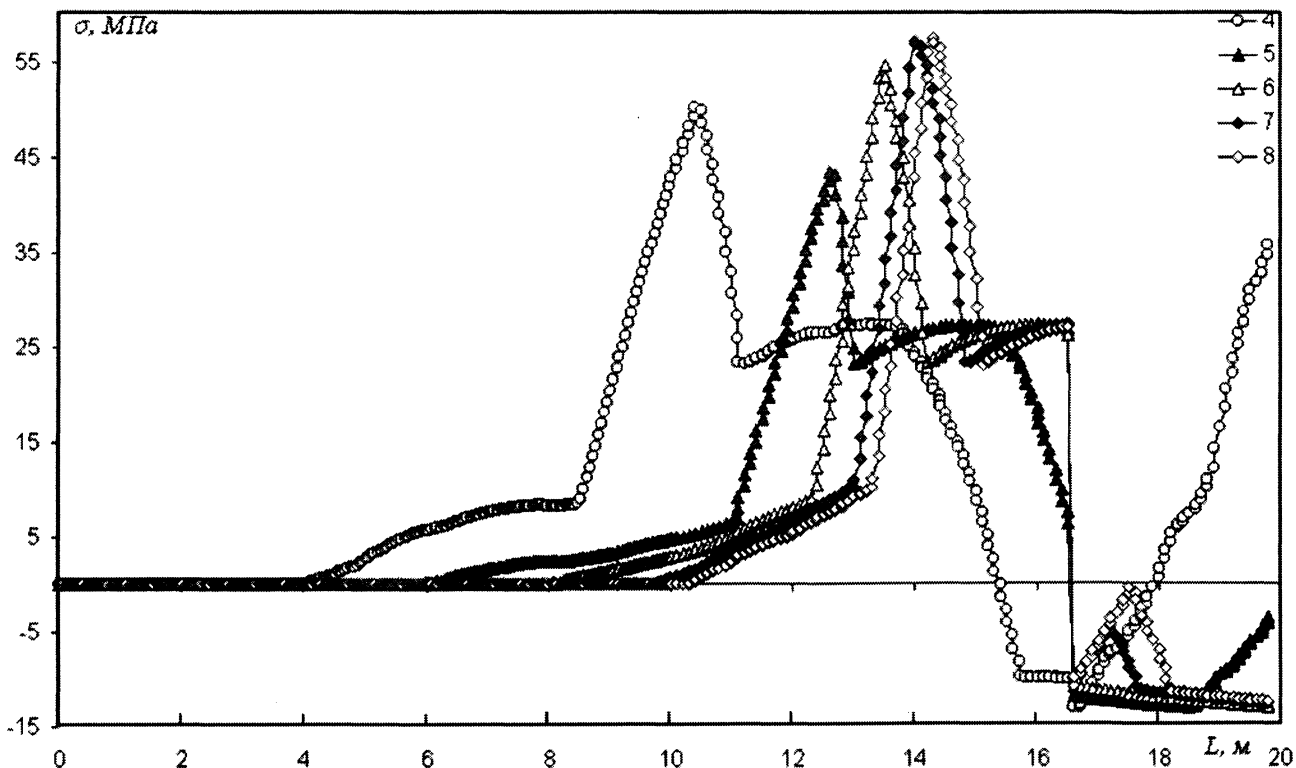


Рис. 5. Увеличенное распределение напряжений по длине круглого слитка (сталь 20) диаметром 300 мм в продольном сечении  $X=0,15$  м для различных направлений (интервал изгиба слитка 1–17 м): 4 –  $Z=0,065$  м; 5 – 0,085; 6 – 0,105; 7 – 0,125; 8 – 0,145 м

На рис. 6 показано распределение напряжений по длине круглого слитка (сталь 20) диаметром 300 мм в продольном сечении  $X=0,06$  м для различных направлений от поверхности. В точках  $Z=0,045$  и  $0,065$  м при движении слитка в ЗВО первоначально возникают чередующиеся растягивающие и сжимающие напряжения, которые после прохождения 4 м для направления 1 переходят в сжимающие.

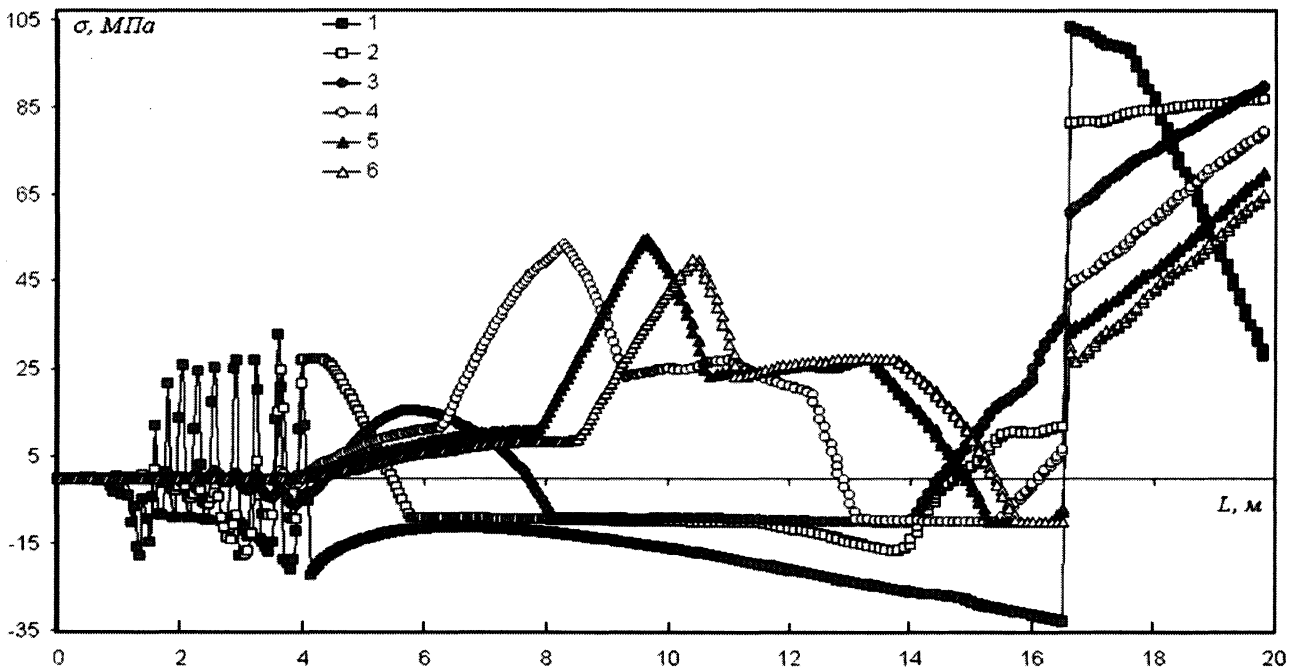


Рис. 6. Распределение напряжений по длине круглого слитка (сталь 20) диаметром 300 мм в продольном сечении  $X=0,06$  м для различных направлений (интервал изгиба слитка 1–17 м): 1 –  $Z=0,045$  м; 2 –  $0,065$ ; 3 –  $0,085$ ; 4 –  $0,105$ ; 5 –  $0,125$ ; 6 –  $0,145$  м

Для направления 2 переход в сжимающие напряжения происходит после 5,5 м. Изменения напряжений для выделенных точек слитка в области вторичного охлаждения носят колебательный характер. На рис. 7, 8 представлено увеличенное распределение напряжений по длине круглого слитка (сталь 20) диаметром 300 мм в продольном сечении  $X=0,06$  м для различных направлений от поверхности. Для точек, ближайших к центру слитка  $Z=0,105$ ,  $0,125$  и  $0,145$  м, наблюдаются два экстремума в характере

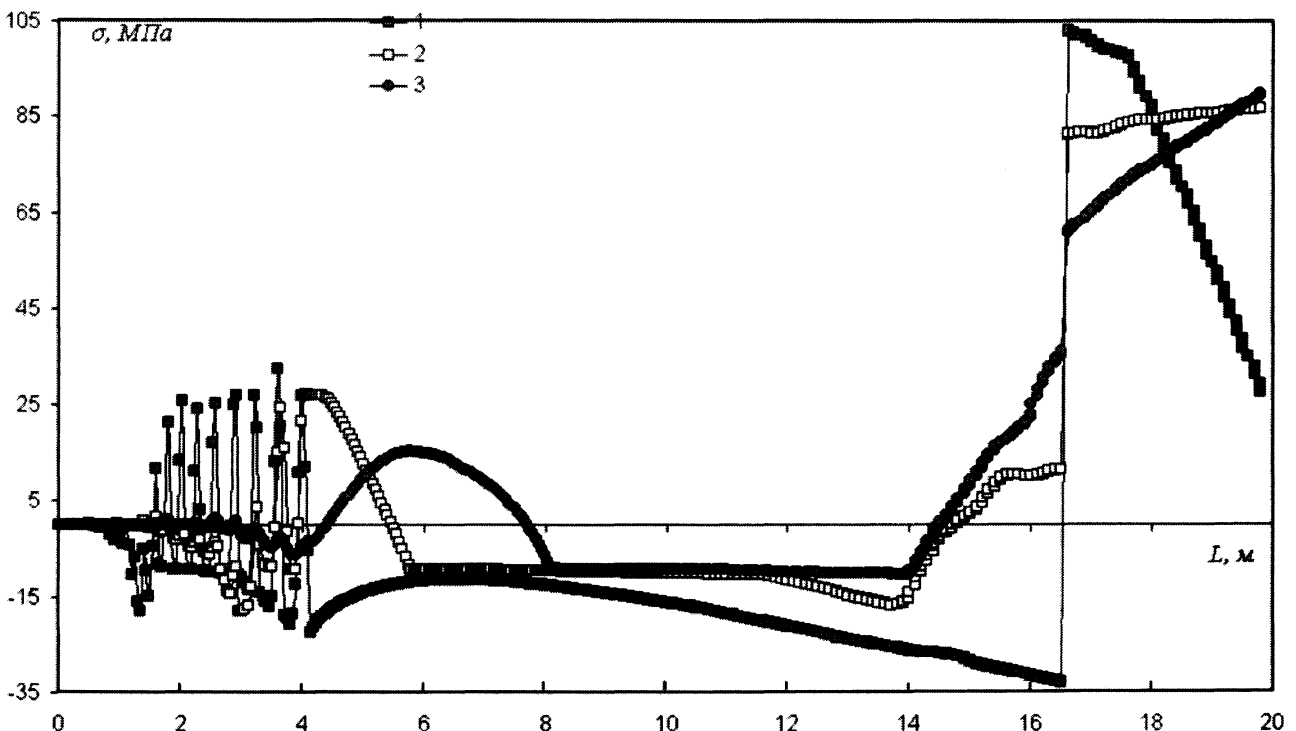


Рис. 7. Увеличенное распределение напряжений по длине круглого слитка (сталь 20) диаметром 300 мм в продольном сечении  $X=0,06$  м для различных направлений (интервал изгиба слитка 1–17 м): 1 –  $Z=0,045$  м; 2 –  $0,065$ ; 3 –  $0,085$  м

изменения напряжений. Первый возникает в интервале 13–17 м, а второй находится в зоне разгиба. Следует отметить, что величина напряжений на зоне разгиба может достигать 105 МПа. Причем для точек поверхности происходит переход сжимающих напряжений в растягивающие. Для внутренних точек слитка после разгиба (17 м) наблюдается незначительный рост растягивающих напряжений. Из рис. 8 видно, что на участке  $12 \leq L \leq 17$  м напряжения в точках 4–6 носят сжимающий характер, а далее растягивающий.

На рис. 8 показано распределение напряжений в продольном сечении  $X=0,06$  м круглого слитка (сталь 20) диаметром 300 мм для различных значений координаты  $Z$ . Из рисунка видно, что на края слитка развиваются сжимающие и растягивающие напряжения, которые могут достигать 20–25 МПа. В центральной части слитка напряжения близки к нулю, что соответствует физике технологического процесса.

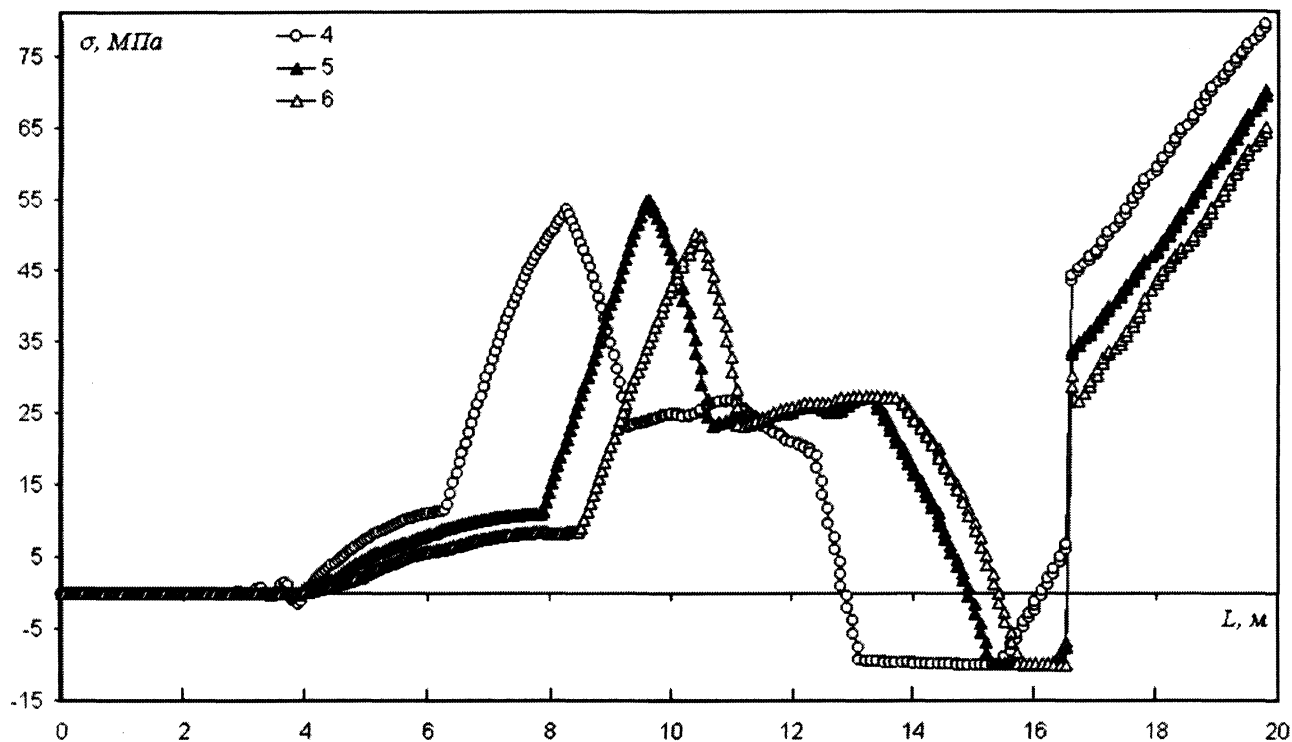


Рис. 8. Увеличенное распределение напряжений по длине круглого слитка (сталь 20) диаметром 300 мм в продольном сечении  $X=0,06$  м для различных направлений (интервал изгиба слитка 1–17 м): 4 –  $Z=0,105$  м; 5 – 0,125; 6 – 0,145 м

Таким образом, проведенные компьютерные исследования показали, что при круглофакельном форсуночном охлаждении в слитке наблюдается нелинейная картина изменения напряжений как по длине, так и в поперечном сечении круглого слитка. Величина напряжений может меняться в широком интервале и достигать в отдельных точках значений порядка 50 МПа. Однако это не означает, что обязательно в этой точке могут возникать 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. Это еще раз свидетельствует о том, что игнорирование в расчетах напряжений пространственных размеров слитка, которое широко применяется в двух- и одномерных моделях, вуалирует истинную картину полей напряженного состояния слитка. Поэтому глубокий анализ напряжений слитка невозможен без решения трехмерных задач термонапряженного состояния.

#### Выводы

1. Представлены результаты компьютерных расчетов распределения напряжений в кристаллизующемся круглом слитке диаметром 300 мм из низкоуглеродистой стали, предназначенной для получения трубной заготовки. Установлен характер изменения напряжений в зоне вторичного охлаждения по длине слитка круглого сечения.

2. Показано, что при круглофакельном форсуночном охлаждении в круглом слитке наблюдаются как растягивающие, так и сжимающие напряжения как по длине, так и в поперечном сечении круглого слитка. Величина напряжений может меняться в широком интервале и достигать в отдельных точках значений порядка 50 МПа.

3. Показана принципиальная возможность получения непрерывно литой заготовки круглого сечения при круглофакельном форсуночном охлаждении на МНЛЗ-3 РУП «БМЗ».

### Литература

1. Чичко А.Н., Кукуй Д.М., Андрианов Н.В. и др. Моделирование влияния охлаждаемых и неохлаждаемых роликов на температуры и напряжения поверхности промышленного слитка в зоне вторичного охлаждения // Литье и металлургия. 2003. №3. С. 131–138.
2. Затвердевание и кристаллизация стальных слитков / Л. Шмрга: Пер. с чешс. / Под ред. В.И. Кашина. М.: Металлургия, 1985.
3. Евтеев Д.П., Кольбанов И.Н. Непрерывное литье стали. М.: Металлургия, 1984.
4. 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.
5. Чичко А.Н., Дроздов Е.А. Компьютерное моделирование термоупругости сплавов, кристаллизующихся в трехмерных пространственных структурах // Докл. НАН Беларуси. 2002. Т.46. №1. С. 115–119.
6. 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.
7. Чичко А.Н. Компьютерные системы моделирования физических процессов // Вестн. БНТУ. 2003. № 2. С. 42–48.



**Республиканская научно-техническая библиотека (РНТБ)  
предлагает специалистам ознакомиться с новыми изданиями по металлургии.**

**Сырье для черной металлургии: Справочное издание: В 2-х томах.**

**Т. 1. Сырьевая база и производство окускованного сырья (сырье, технологии, оборудование) / М.Г.Ладыгичев и др. М.: Машиностроение-1, 2001. 896 с.**

Предлагаемое издание имеет целью отразить новейшие достижения в области подготовки железорудного сырья к металлургическому переделу в широком аспекте, включающем рудную базу, технологические решения, инженерные расчеты, конструкции агрегатов и компоновочные решения фабрик окускования, метрологические параметры в технологическом процессе, системы автоматического управления.

В издании даны сведения о месторождениях железорудного сырья и предприятиях по их переработке. Приведены различные технологические схемы производства агломерата и окатышей. Рассмотрены особенности использования топлива и огнеупорных материалов в агрегатах с целью обеспечения максимального ресурсосбережения. Представлены конструкции, компоновочные решения и оптимальные режимы эксплуатации оборудования. Даны сведения о метрологическом обеспечении технологических процессов.

Справочник может служить базой для формирования и принятия решений по техническому перевооружению, для подборки инженерных расчетов, содержит сведения о новейших решениях по конструкциям агрегатов и узлов и современные решения в области эффективного топливопотребления.

Справочник ориентирован на инженерно-технический персонал: для инженерно-технических работников научно-исследовательских институтов, а также наладочных организаций и различных промышленных предприятий.

**Лякишев Н.П., Шалимов А.Г. Развитие технологии непрерывной разливки стали / В.Н.Лякишев, А.Г.Шалимов. М.: ЭЛИЗ, 2002. 208 с., ил.**

Совершенствование технологии и оборудования непрерывной разливки стали является в современных условиях важнейшим элементом повышения эффективности всего металлургического производства. В издании приводятся сведения о новейших отечественных и зарубежных разработках в области разливки стали.

В издании обобщено содержание наиболее интересных публикаций по непрерывной разливке стали за последние 10–15 лет.

Для широкого круга читателей металлургических и смежных специальностей.

**Издавания не продаются!**

(В скобках указаны шифры хранения изданий в библиотеке).

Ознакомиться с изданиями, заказать копии отдельных страниц, в том числе по электронной почте, можно по адресу: г. Минск, пр. Машерова, 7, РНТБ, читальный зал книжных изданий (к. 603), тел. (017) 226-61-88.

РНТБ также оказывает информационную поддержку предприятиям и организациям различных форм собственности в рамках договора, который предлагает более 60 библиотечно-информационных услуг. По вопросам заключения договора и записи в РНТБ обращаться в комн. 606, тел. (017) 223-31-07. E-mail: rlst@rlst.org.by; www.rlst.org.by; электронный каталог книг и периодических изданий РНТБ: <http://rntbcat.org.by>.