



There are carried out the computer calculations of the stresses, arising because of the mechanical and thermal gradients in industrial ingots, with the help of the system "ProNRS-2". For the ingot of size 250x300, produced at BMZ, there are presented dependences of compression and tensile stresses along the whole length of ingot. On the basis of the carried out computer calculations of the three-dimensional ingot there is shown, that in the areas of secondary cooling the thermal stresses dominate over mechanical ones, and in the area of rectification there is observed the converse tendency.

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

УДК 669.27:519

МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЫ «ПроНРС-2» МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕРМИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В СТАЛЬНОМ СЛИТКЕ, ДВИЖУЩЕМСЯ ПО РАДИАЛЬНОМУ ИЗГИБУ В МНЛЗ

Важнейшими факторами, влияющими на процесс образования трещин в слитке, являются механический изгиб, связанный с технологией вытягивания слитка, и градиенты температур, возникающие во всех точках слитка из-за смены тепловых зон, проходимых слитком [1]. В результате этого возникают сжимающие и растягивающие напряжения, характер которых может изменяться в зависимости от тепловой зоны и кривизны слитка. Сложный аномальный характер напряжений наблюдается в поверхностных слоях слитка, где могут возникать наиболее значительные напряжения, приводящие к росту трещин [2]. Проблема расчета температурных и напряженных полей в слитке, вытягиваемом вертикально (без учета кривизны), для трехмерного случая была рассмотрена в [3]. В связи с этим представляет научный и практический интерес проведение расчетов изменения напряжений во времени и по длине для слитка, имеющего кривизну, обусловленную использованием промышленного оборудования.

Целью настоящей работы является компьютерный расчет термических и механических напряжений слитка, имеющего заданные размеры и вытягиваемого с постоянной скоростью методом непрерывного литья.

В качестве объекта исследования была выбрана технологическая схема МНЛЗ-3 получения слитка, используемая на РУП «БМЗ». Для учета механического изгиба, который заложен в оборудовании МНЛЗ-3, использовали специальную методику, в основу которой положено разбиение всего слитка на пространственные элементы, имеющие изгиб с заданным коэффициентом деформации в зависимости от внутреннего и внешнего радиуса. При этом радиус изгиба был принят

равным $R=10$ м. Относительную деформацию определяли на основе функции, зависящей от шага пространственной сетки по координатам x и y — $\varepsilon = f(\Delta x, \Delta y, R)$, где $\Delta x, \Delta y$ — шаг по пространственной конфигурации слитка.

При выполнении настоящей работы были разработаны математические модели, позволяющие учитывать упругопластические свойства слитка в условиях его движения по изгибающемуся пространственному контуру. Уравнения, использованные при расчетах, описаны в [4, 5]. Численная реализация этих уравнений осуществлена в компьютерной системе «ПроНРС-2». Результаты расчетов приведены на рис. 1 — 11.

На рис. 1 представлено 3d-изображение слитка размером 250x300 мм. Указанные размеры взяты на основе данных предприятия и соответствуют реальным размерам работающей МНЛЗ-3. В расчетах учитывали зоны кристаллизатора и три зоны вторичного охлаждения, которые разнесены в пространстве тремя воздушными прослойками. Весь слиток был разбит в виде клеточной пространственной структуры. Каждой клетке в зависимости от ее местоположения присваивали значения теплопроводности, плотности, теплоемкости в зависимости от того, являлась ли клетка расплавом, воздухом, водой, охлаждаемым или неохлаждаемым участком ролика. При анализе расчетов напряженного состояния слитка были выделены несколько точек продольного сечения слитка: точка А1 соответствует пространственной линии внутреннего контура слитка, которая в процессе изгиба сжимается; точка А2 находится в области центра слитка; точка А3 соответствует выделенной внешней линии, по которой происходит растяжение слитка. Точки А1 и А3 характеризуют процесс кристаллизации в корке слитка на внутренней и внешней гранях.

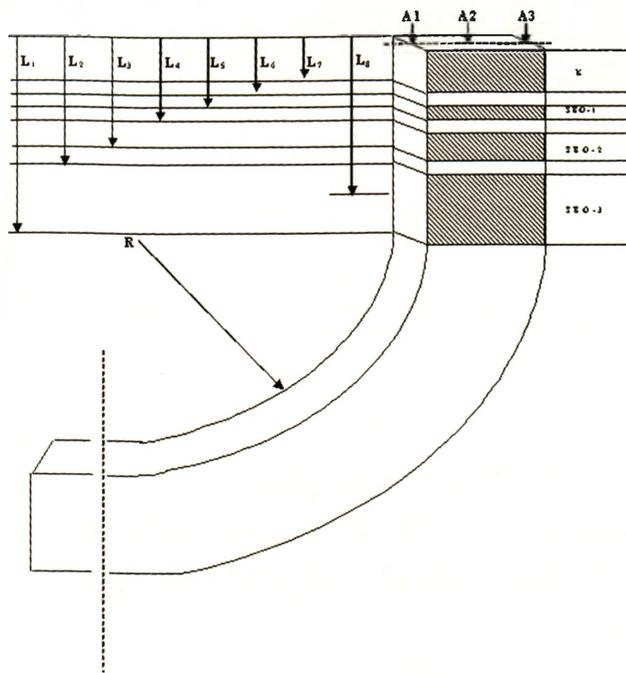


Рис. 1. Схема изгибающегося слитка в машине непрерывного литья МНЛЗ-3 заготовок с кристаллизатором (К) и роликовой секцией (ЗВО-1, ЗВО-2, ЗВО-3): $L_1 = 3839$ мм, $L_2 = 2181$ мм, $L_3 = 1913$ мм, $L_4 = 1317$ мм, $L_5 = 1170$ мм, $L_6 = 876$ мм, $L_7 = 800$ мм, $L_8 = 2746$ мм (изгиб), $R = 10$ м

На рис. 2 представлен интерфейс программы «ПроНПС-2», с помощью которой рассчитывали распределения напряжений. Как видно из рисунка, анализируемая плоскость $Y = 4,65$ соответствует сечению по длине слитка 4 м 65 см. На внешней стороне слитка в поперечном сечении после изгиба наблюдаются растягивающие напряжения.

При выполнении работы были проделаны отдельные расчеты по учету механических напряжений в слитке. Как известно, эти напряжения развиваются на участке МНЛЗ-3 «изгиб – выпрямление» и в значительной степени зависят от геометрии вытягиваемой области. С практической точки зрения представляет большой интерес оценка влияния этой геометрии на образование трещин в слитке. Особенно важно оценить сравнительные вклады, так называемых термических градиентов (напряжения первого рода) и механических градиентов. Следует отметить, что при проведении расчета учитывали пластическую деформацию двух видов. Первая группа деформаций относилась к сжимающим напряжениям как термическим, так и механическим, вторая группа – к растягивающим напряжениям. Учет этих групп проводили на основе функции $\sigma = f(\epsilon, T)$,

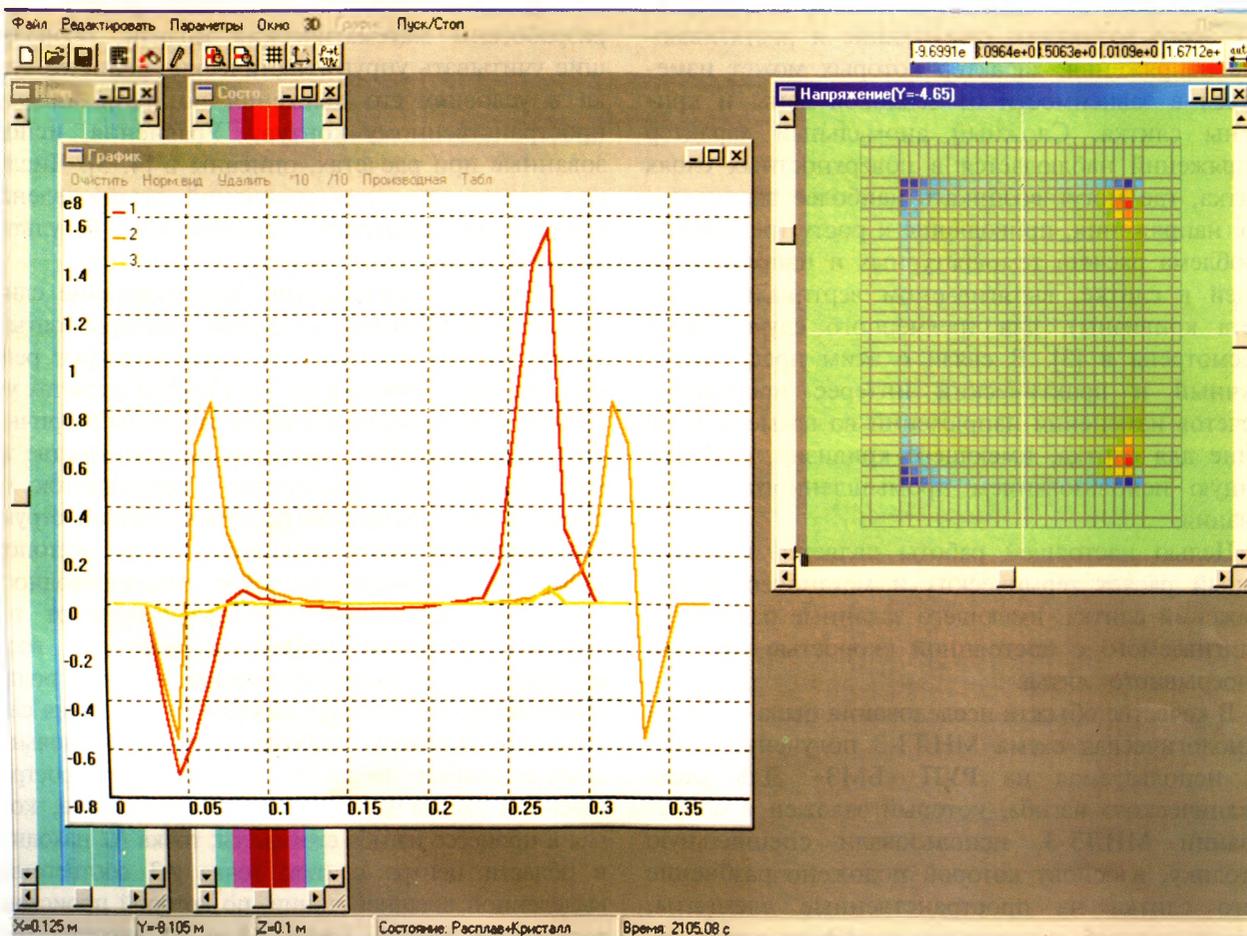


Рис. 2. Интерфейс компьютерной системы «ПроНПС-2», использованной для расчета распределения напряжений, возникающих по вине температуры и механического изгиба в зависимости от поперечного сечения слитка из стали 70К

которые выбирали по экспериментальным данным для стали 70К с учетом линейности участка упругой деформации.

На рис. 3 представлено распределение напряжений, возникающих в сечении слитка из-за оборудования (механический изгиб). Выделенная плоскость соответствует участку слитка после изгиба, но перед участком распрямления ($Y=13,3$ м). Как видно из рисунка, по линии А1 на участке от 0 до 17 м развиваются отрицательные (сжимающие) напряжения, которые на участке от 17 до 18 м слитка переходят в растягивающие, что свидетельствует о переходе вогнутости слитка в прямолинейный участок (выпрямление). По выделенной линии А3, соответствующей внешнему участку слитка большой дуги, до 17 м развиваются растягивающие напряжения. После 17 м они переходят из растягивающих в сжимающие. По линии А2, соответствующей центральной области слитка, напряжения от механического изгиба незначительны, что связано с длительным временным промежутком жидкой сердцевины

слитка. На рис. 4 показано распределение критических напряжений, возникающих из-за механического изгиба. Критические напряжения характеризовали участки слитка, имеющие наибольшую склонность к образованию трещин. Чем больше критические напряжения, тем выше вероятность образования трещин в определяемой точке. Математически эта величина соответствовала расчетному напряжению, полученному экстраполяцией данных по пределу прочности на растяжение и сжатие. Таким образом, на данном этапе вычисляли величину, характеризующую пространственное расположение возможных мест образования трещин. Эта величина, как и относительная деформация, зависела от системы координат, наложенной на геометрию слитка. Как видно из рисунка, в поперечном сечении для $Y=2,77$ м (участок после начала изгиба) по направлению от внутреннего до внешнего радиуса слитка развиваются сжимающие напряжения, переходящие в растягивающие. Причем при движении в глубь слитка (направление 2) наблюдается уменьшение как сжимающих, так и растягивающих напряжений.

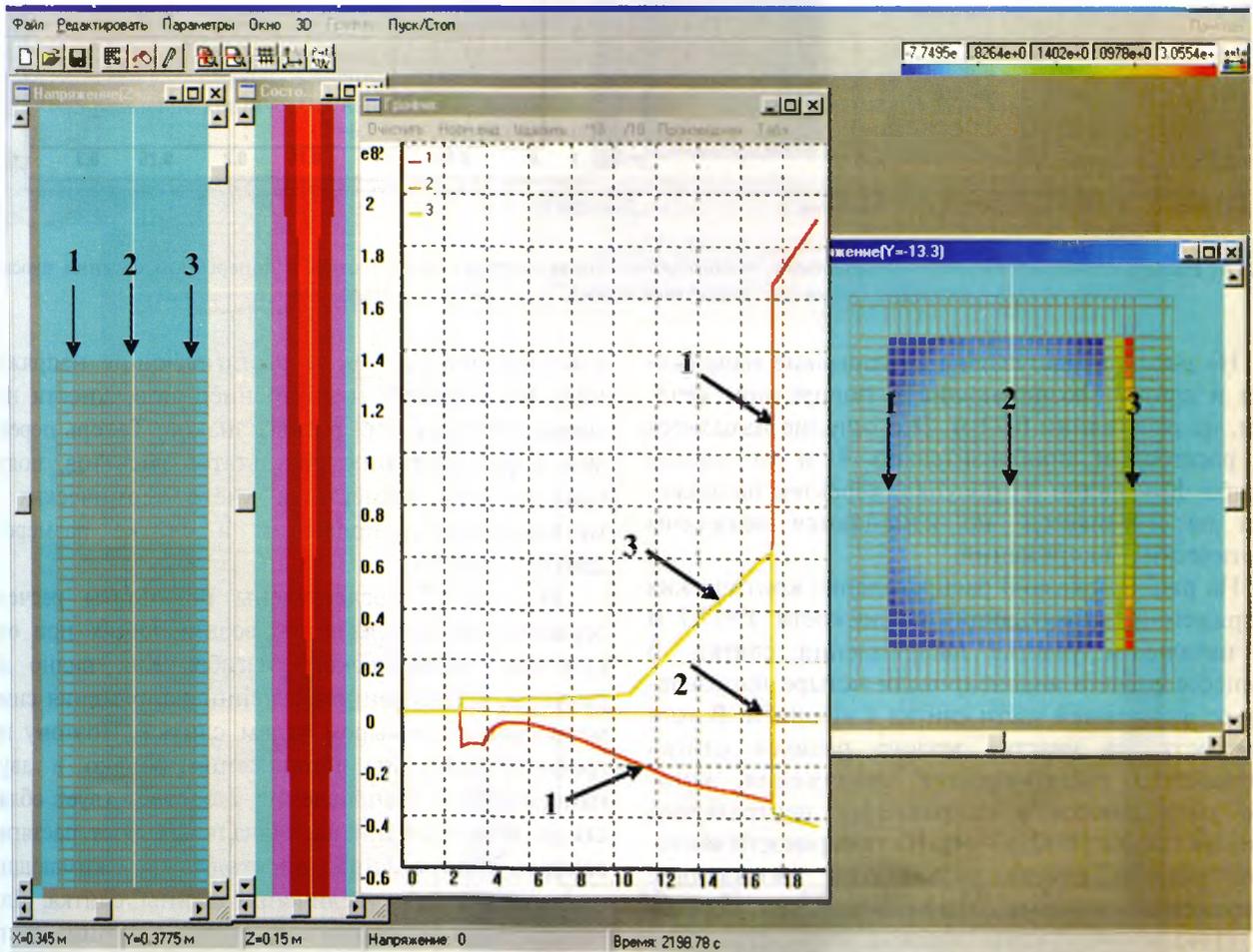


Рис. 3. Распределение напряжений, возникающих по вине механического изгиба в зависимости от длины слитка из стали 70К для внутренних точек А1(1), А2(2), А3(3)

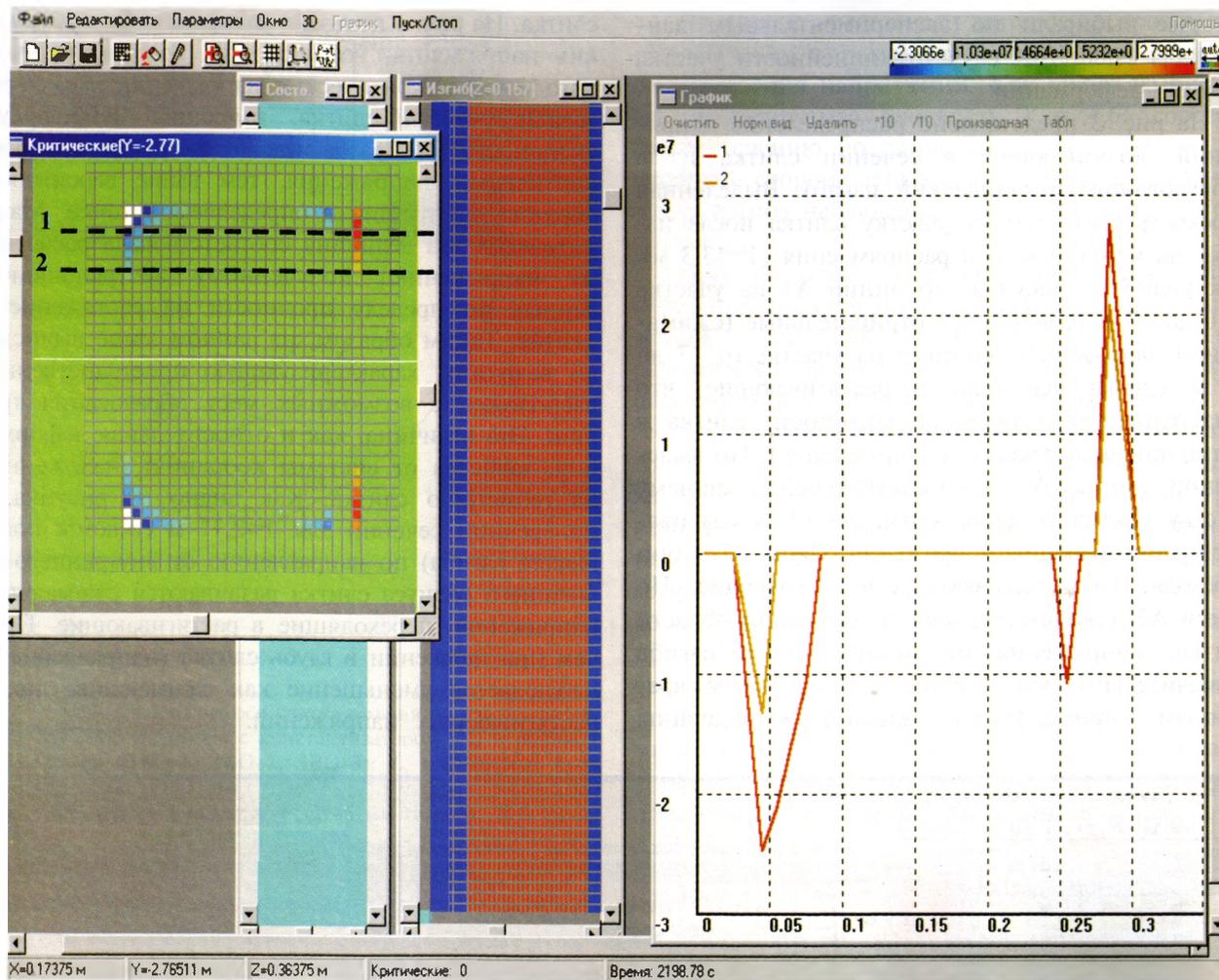


Рис. 4. Распределение критических напряжений, возникающих из-за механического изгиба в поперечном сечении плоскости ($Y=2,76$ м) для различных линий 1, 2 слитка из стали 70К

На рис. 5 представлены критические напряжения в слитке, возникающие в поперечном сечении, на расстоянии 6,72 м. Это сечение находится на расстоянии приблизительно 4 м от начала изгиба. Как видно из рисунка, характер напряжений не изменяется, но изменяются величины критических напряжений.

На рис. 6 показано распределение критических напряжений, возникающих в плоскости $Y=17,7$ м на начальном участке выпрямления слитка. В процессе расчета анализировали четыре направления от внутренней части слитка к внешней. В этой плоскости на участке малого радиуса слитка развиваются растягивающие напряжения, которые уменьшаются в направлении центрального сечения слитка (1→2→3→4). На поверхности внешнего радиуса слитка развиваются сжимающие напряжения, которые уменьшаются при переходах (1→2→3→4). Таким образом, на участке выпрямления на поверхностях внутреннего и внешнего радиуса меняется знак напряжений, заложенных при изгибе слитка. Расчеты показывают, что механический изгиб слитка в МНЛЗ-3 формирует

как сжимающие, так и растягивающие напряжения. На внешней и внутренней поверхности находятся напряжения разных знаков. Теперь перейдем к рассмотрению результатов расчетов, полученных при совместном учете термических и механических напряжений в слитке размером 250x300 мм.

На рис. 7 представлены результаты расчета термических напряжений, возникающих при отсутствии механического изгиба. Как видно из рисунка, в выделенном сечении напряжения симметричны по четырем углам слитка. Поэтому на графике показаны напряжения только в двух направлениях. Направление 1 соответствует области вблизи угла слитка. Начальный рост растягивающих напряжений переходит в сжимающие напряжения при увеличении длины слитка. Для направления 2, соответствующего середине слитка, напряжения незначительны и колеблются вблизи нуля, практически по всей длине слитка, так как на рассчитанном участке середина слитка жидкая.

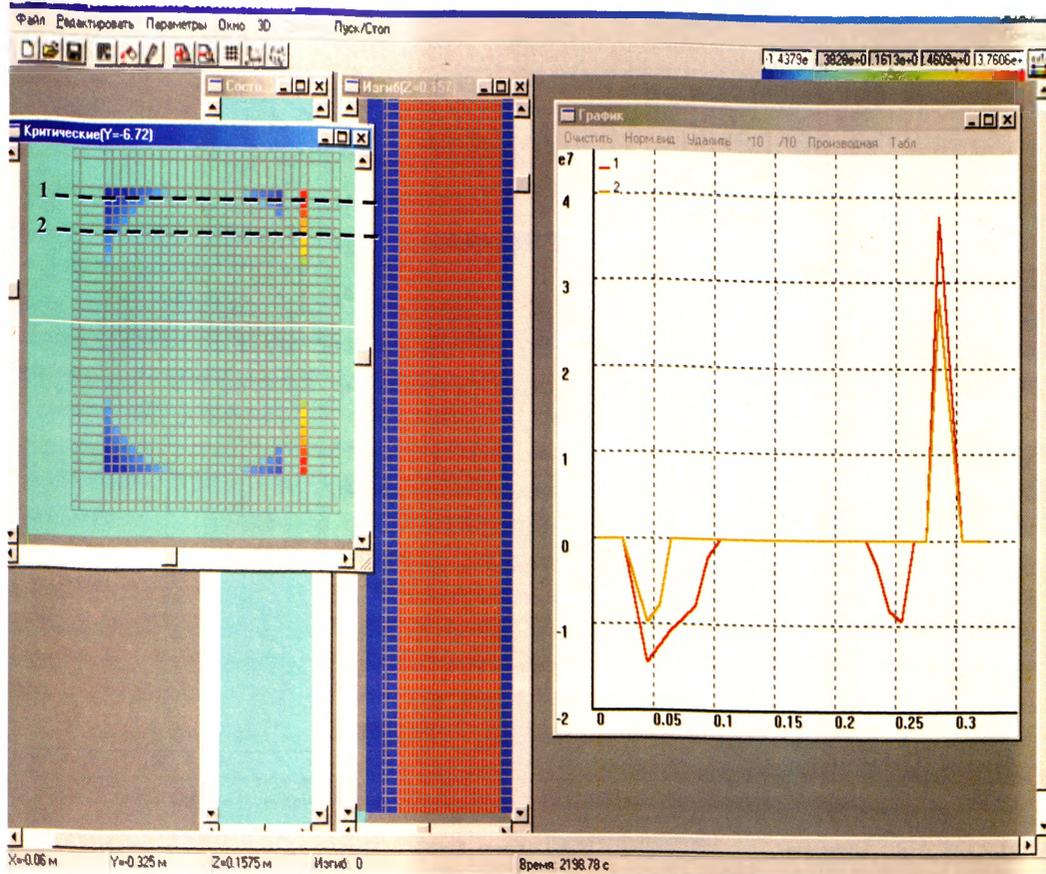


Рис. 5. Распределение критических напряжений, возникающих из-за механического изгиба в поперечном сечении плоскости ($Y=6,72$ м) для различных линий 1, 2 слитка из стали 70К

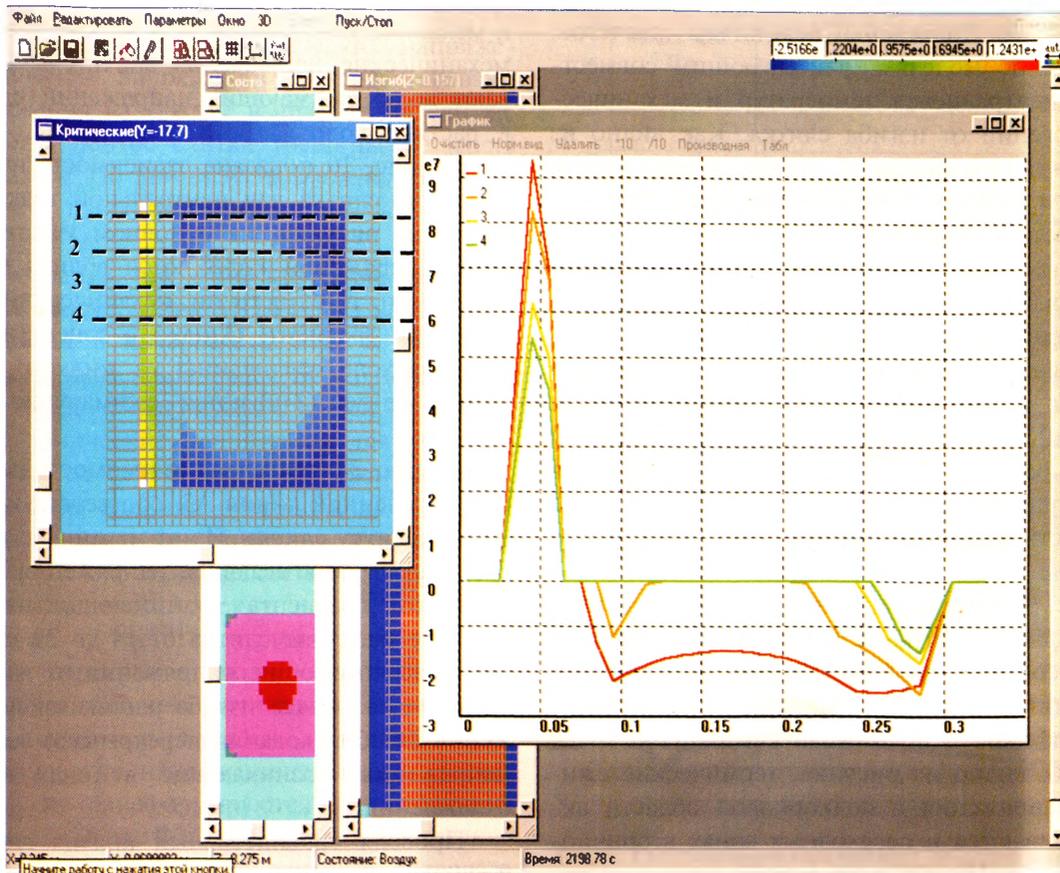


Рис. 6. Распределение критических напряжений, возникающих из-за механического изгиба в поперечном сечении плоскости ($Y=17,7$ м) в начале «выпрямления» для различных линий 1, 2, 3, 4 слитка из стали 70К

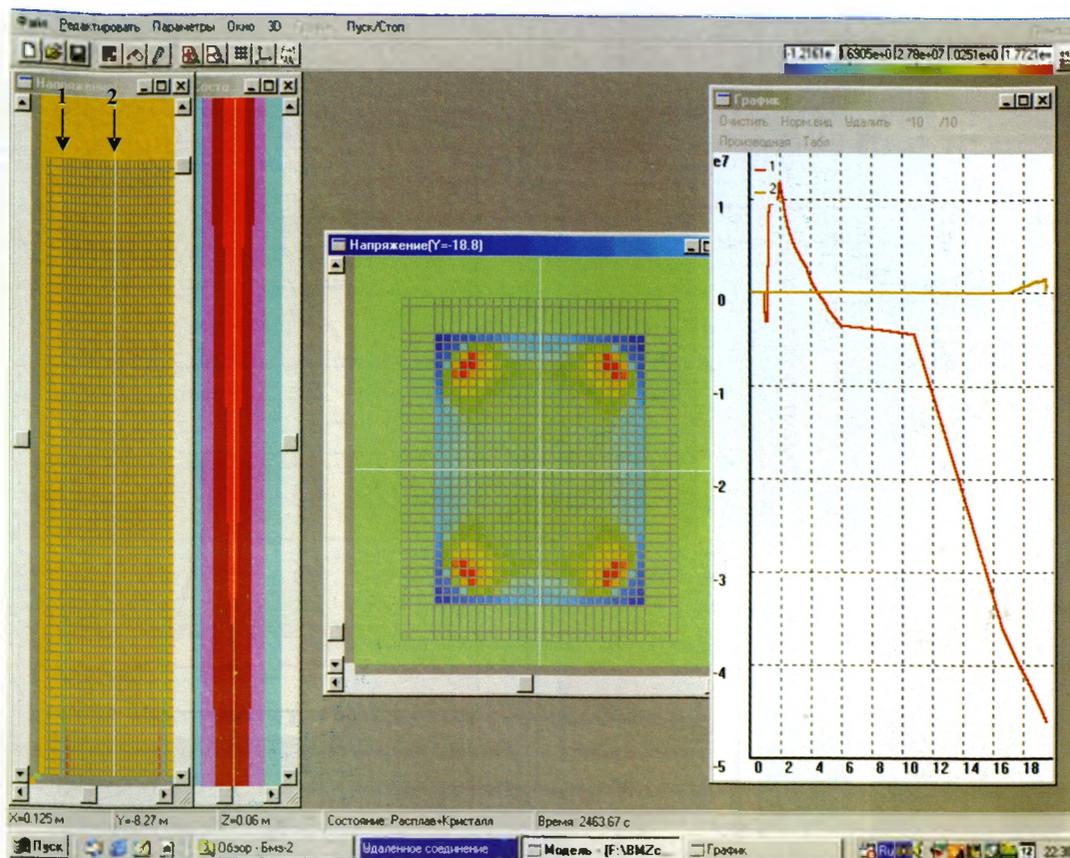


Рис. 7. Распределение напряжений, возникающих из-за градиента температур в зависимости от длины слитка из стали 70К для выделенных линий 1 и 2

На рис. 8 приведены результаты расчетов, полученные по моделям, учитывающим совместное влияние градиента температур и механических напряжений от изгиба слитка. Как видно из рисунка, в направлении 1, находящемся вблизи внутреннего радиуса слитка, напряжения начинаются с роста сжимающих деформаций, которые уменьшаются при прохождении зон вторичного охлаждения. На участке от 6 до 17 м напряжения в направлении 1 сжимающие и растут по абсолютной величине. В зоне изгиба знак напряжений изменяется и наблюдается рост растягивающих напряжений. В направлении 2, соответствующем внешнему радиусу слитка, напряжения являются растягивающими на участке от 0 до 17 м. В зоне изгиба растягивающие напряжения переходят в сжимающие.

На рис. 9 представлены напряжения, возникающие по длине слитка в выделенном направлении А1, соответствующем малому внутреннему радиусу слитка. Следует отметить, что для построения графиков использовали свыше 1100 точек слитка. Как видно из рисунка, термические сжимающие напряжения в подкорковой области активно развиваются в переходных зонах вторичного охлаждения. Напряжения изгиба накладываются на них при совместном влиянии термических

и механических напряжений. В зоне выпрямления механические напряжения значительно перекрывают долю сжимающих напряжений и переходят в растягивающие.

На рис. 10 показана зависимость напряжений по длине слитка для центральной точки А2. Как видно из рисунка, на основном участке от 0 до 17 м напряжения колеблются вблизи нуля независимо от того, есть ли механический или термический градиент. Однако в зоне выпрямления при переходе сердцевины из жидкого состояния в твердое увеличиваются сжимающие напряжения.

На рис. 11 приведена зависимость напряжений для выделенной линии А3, соответствующей большому радиусу слитка. Из-за механического изгиба возникают растягивающие напряжения, из-за термического градиента – сжимающие напряжения, которые на длине слитка от 14 до 20 м перекрывают растягивающие напряжения от изгиба. В то же время в начале изгиба растягивающие напряжения от оборудования перекрывают термические напряжения, возникающие в зонах вторичного охлаждения.

Проводя сравнительный анализ данных рис. 9–11, можно видеть, что для термических градиентов наблюдаются симметричные зависимости

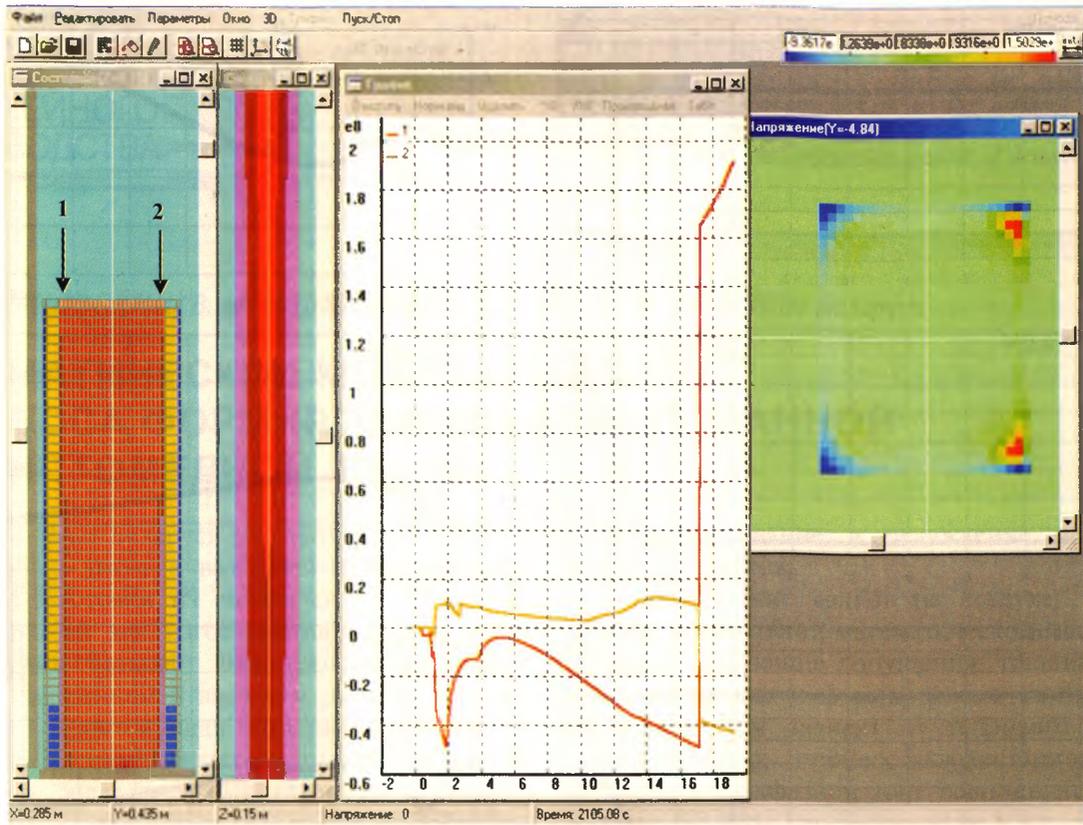


Рис. 8. Распределение напряжений, возникающих из-за совместного влияния градиента температур и механического изгиба, в зависимости от длины слитка из стали 70К для выделенных линий 1 и 2

напряжений для точек А1 и А3. При совместном влиянии термических и механических напряжений термические напряжения гасят растягивающие напряжения на участке выпрямления слитка. Как видно, в центре слитка трещины не могут образовываться. По линии А1 возможно образование трещин из-за растягивающих усилий на участке 17–18 м.

Таким образом, чисто механические напряжения за счет оборудования МНЛЗ-3 на внутренней стороне слитка в интервале 2,5–17 м являются сжимающими, изменяющимися через перегиб на участке 5–6 м, и растягивающимися в районе 17–18 м. Термические напряжения для внутренней поверхности слитка являются сжимающими. При совместном влиянии оборудования и термических градиентов в зоне вторичного охлаждения в интервале 1–4 м термические напряжения перекрывают вклад механических напряжений. В то же время от 17 до 18 м доля механических напряжений перекрывает долю термических напряжений. Для внешней части слитка, движущейся по большому радиусу в интервале 2,5–17 м механические напряжения являются растягивающими и трансформируются в сжимающие на участке 17–18 м. В то же время термические напряжения являются сжимающими в интервале 1–18 м. При совместном учете температурных градиентов и механических напряжений в интер-

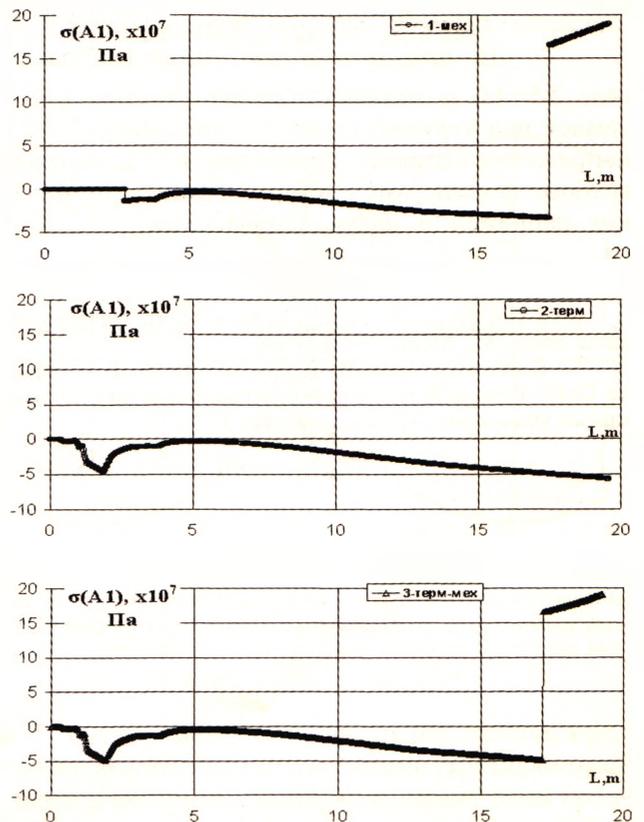


Рис. 9. Распределение напряжений по длине слитка из стали 70К по линии точки А1: 1 – учет механических напряжений; 2 – учет термических напряжений; 3 – учет механических и термических напряжений

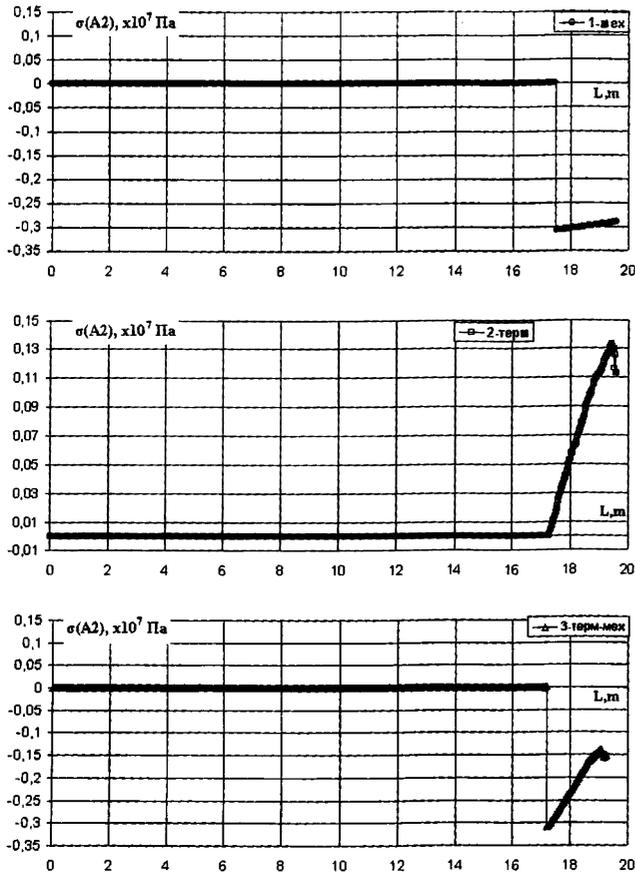


Рис. 10. Распределение напряжений по длине слитка из стали 70K по линии точки A2: 1 – учет механических напряжений; 2 – учет термических напряжений; 3 – учет механических и термических напряжений

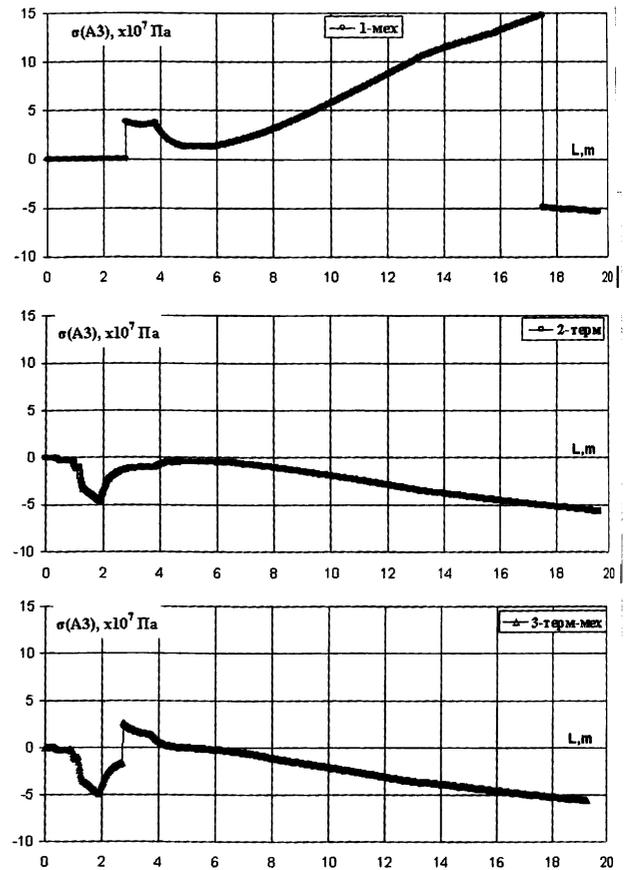


Рис. 11. Распределение напряжений по длине слитка из стали 70K по линии точки A3: 1 – учет механических напряжений; 2 – учет термических напряжений; 3 – учет механических и термических напряжений

вале 2,5–3,0 м механические напряжения преобладают над термическими, а в интервале 7–17 м напряжения плавно переходят в сжимающие, которые формируются доминированием термических напряжений над механическими.

Литература

1. Евтеев Д. П., Кольбалов И. Н. Непрерывное литье стали. М.: Металлургия, 1984.
2. Сладкоштитев В. Т., Потанин Р. В., Суладзе О. Н., Рутес В. С. Непрерывная разливка стали на радиальных установках. М.: Металлургия, 1974.

3. Чичко А. Н., Кукуй Д. М., Соболев В. Ф. и др. Компьютерная система «ПроНРС» и трехмерное моделирование распределения температур, напряжений и углерода в процессе непрерывной разливки стали // Литье и металлургия. 2002. № 3. С. 21–27.
4. 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.
5. Чичко А. Н., Яцкевич Ю. В., Соболев В. Ф. Трехмерное математическое моделирование термонапряженного состояния стальной детали // Литье и металлургия. 2001. № 4. С. 82–84.