



*On the basis of the system "ProNRS-2" there are carried out the computer calculations of tensile and compressive stresses along the length of the ingot of size 250x300 mm for the group of industrial steels. There is received the information about the stresses in ingots from the steel 40X, 70K, 2C45, 20C45, 20XH3A. There is shown, that the highest level of tensile stresses is observed for the ingot from the steel 40X, and the lowest – for the ingot from the steel 70K.*

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

УДК 669.27:519

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОХЛАЖДАЕМЫХ И НЕОХЛАЖДАЕМЫХ РОЛИКОВ НА ТЕМПЕРАТУРЫ И НАПРЯЖЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПРОМЫШЛЕННОГО СЛИТКА В ЗОНЕ ВТОРИЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Одним из важнейших вопросов теории кристаллизации слитков является вопрос о характере изменения температурного поля и напряжений в области перехода жидко-твердого слитка в зоне вторичного охлаждения [1]. В промышленном процессе непрерывной разливки стали структура зон вторичного охлаждения является дискретной по характеру теплоотдачи и состоит из водяной (паровой) рубашки, воздушной прослойки, охлаждаемых и неохлаждаемых роликов. Это приводит к неоднородному температурному полю и, как следствие, к сложному характеру сжимающих и растягивающих напряжений в слитке. Анализ литературных данных показывает, что именно здесь происходит формирование основных свойств непрерывнолитой заготовки. Поэтому представляют научный интерес детальные компьютерные расчеты этой области слитка, тем более, что экспериментально проследить динамику изменения температур в этой области современными приборами невозможно.

Цель настоящей работы – компьютерный расчет трехмерного температурного и напряженного поля в областях «кристаллизатор – воздух – пар – охлаждаемые ролики – неохлаждаемые ролики» движущегося слитка размером 250x300 мм из различных марок сталей, получаемых в МНЛЗ-3.

Для расчета были использованы математические модели термонапряженного состояния, включающие уравнения равновесия и трехмерное уравнение теплопроводности [2]. Модель термонапряженного состояния была реализована в разрабатываемой в БНТУ компьютерной системе «ПроНРС» [3]. В качестве марок сталей для расчета выбраны: 70К, 40Х, 20ХН3А и 2С45. По этим маркам сталей на основе данных технологического процесса разливки стали на МНЛЗ-3 (схема

реализована на РУП «БМЗ») были отобраны для расчета температуры разливки, скорость разливки, расходы воды на различные участки зоны вторичного охлаждения, уровень расплавов в кристаллизаторе и характеристики его изменения. Для перечисленных марок сталей были взяты из экспериментальных данных [3, 4] зависимости теплопроводности, модуля Юнга, модуля сдвига, коэффициента линейного расширения, плотности от температуры, а также теплоты кристаллизации. В качестве базовой схемы структуры зоны вторичного охлаждения приняты данные, приведенные на рис. 1. В слитке было выделено несколько направлений, в которых, как показали предварительные исследования, наиболее удобно анализировать характер напряжений и температур. На рис. 2 показаны изображение одного из продольных сечений рассчитываемой области и положение точек, в которых анализировали изменения напряжений и температур.

На рис. 3 представлено распределение температур для плоскости  $X=0,125$  м и для точки, находящейся на расстоянии  $Z=0,0025$  м от поверхности слитка. Каждой марке стали соответствует свой порядковый номер. Расчеты проведены по длине слитка, соответствующей началу кристаллизатора и концу третьей зоны вторичного охлаждения. В этом интервале находятся кристаллизатор и три зоны вторичного охлаждения. Каждая зона вторичного охлаждения была разбита еще на несколько зон, соответствующих паровой рубашке, воздушной прослойке, охлаждаемым и неохлаждаемым роликам. Все положения зон, их размеры соответствовали размерам МНЛЗ-3, используемой на РУП «БМЗ». Анализ изменения температур для четырех марок сталей показал, что в зоне кристаллизатора в области от 0 до 0,84 м кривая изменения температуры уменьшается для

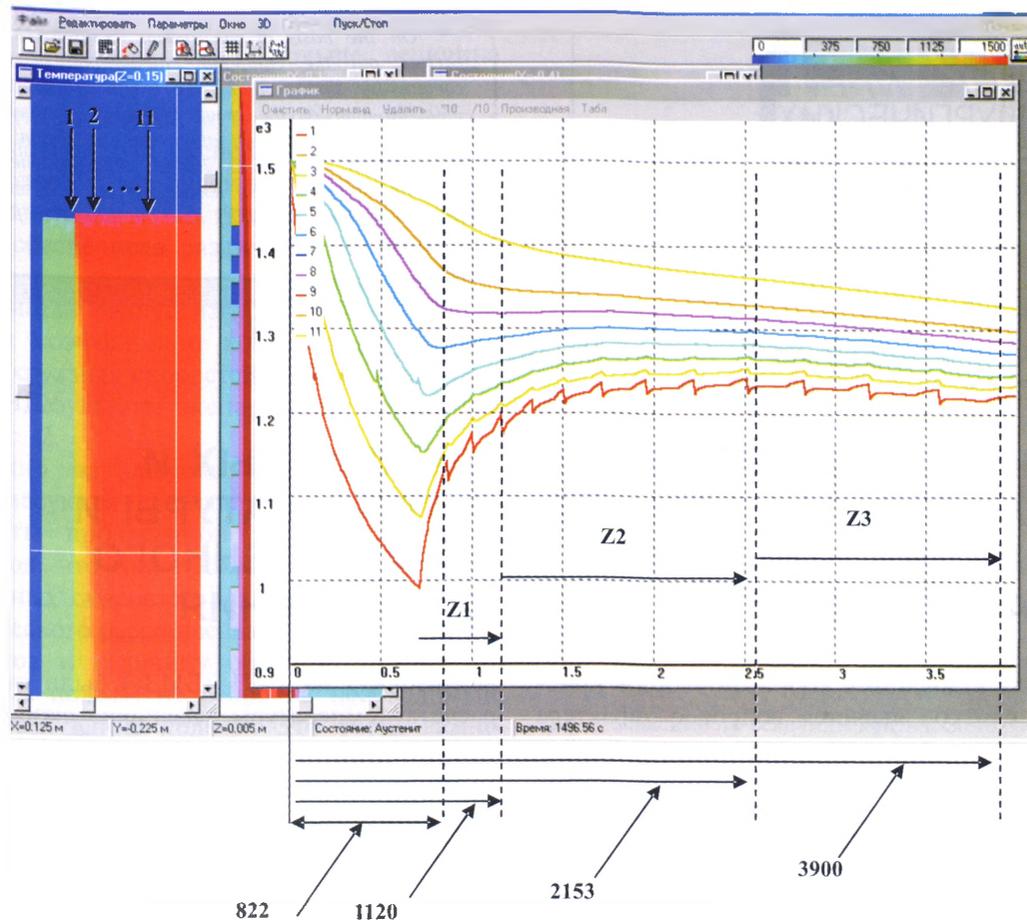


Рис. 1. Распределение температур в центральном сечении слитка, проходящем через зоны «кристаллизатор – воздух – ЗВО1 (воздух – охлаждаемые ролики – неохлаждаемые ролики – пар) – ЗВО2 (воздух – охлаждаемые ролики – неохлаждаемые ролики – пар) – ЗВО3 (воздух – охлаждаемые ролики – неохлаждаемые ролики – пар)» с размерами МЛЗ-3 (сталь 80К, слиток размером 250х300 мм)

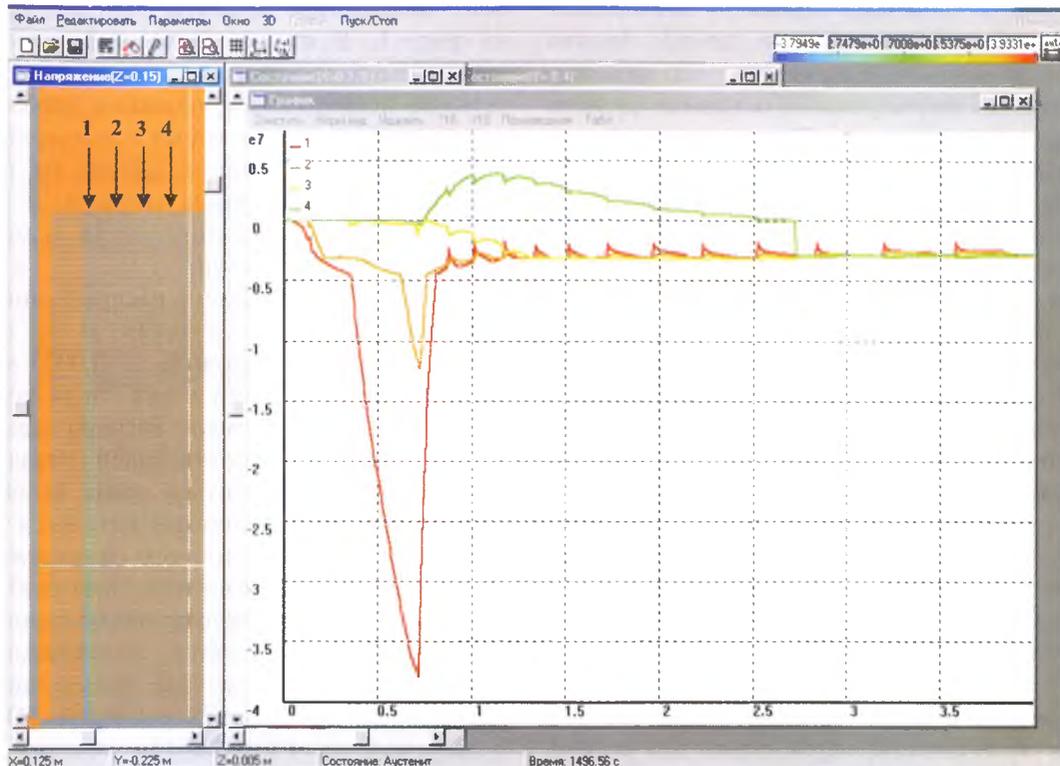


Рис. 2. Распределение напряжений в центральном сечении слитка, проходящем через зоны «кристаллизатор – воздух – ЗВО1 (воздух – охлаждаемые ролики – неохлаждаемые ролики – пар) – ЗВО2 (воздух – охлаждаемые ролики – неохлаждаемые ролики – пар) – ЗВО3 (воздух – охлаждаемые ролики – неохлаждаемые ролики – пар)» с размерами МЛЗ-3 (сталь 80К, слиток размером 250х300 мм)

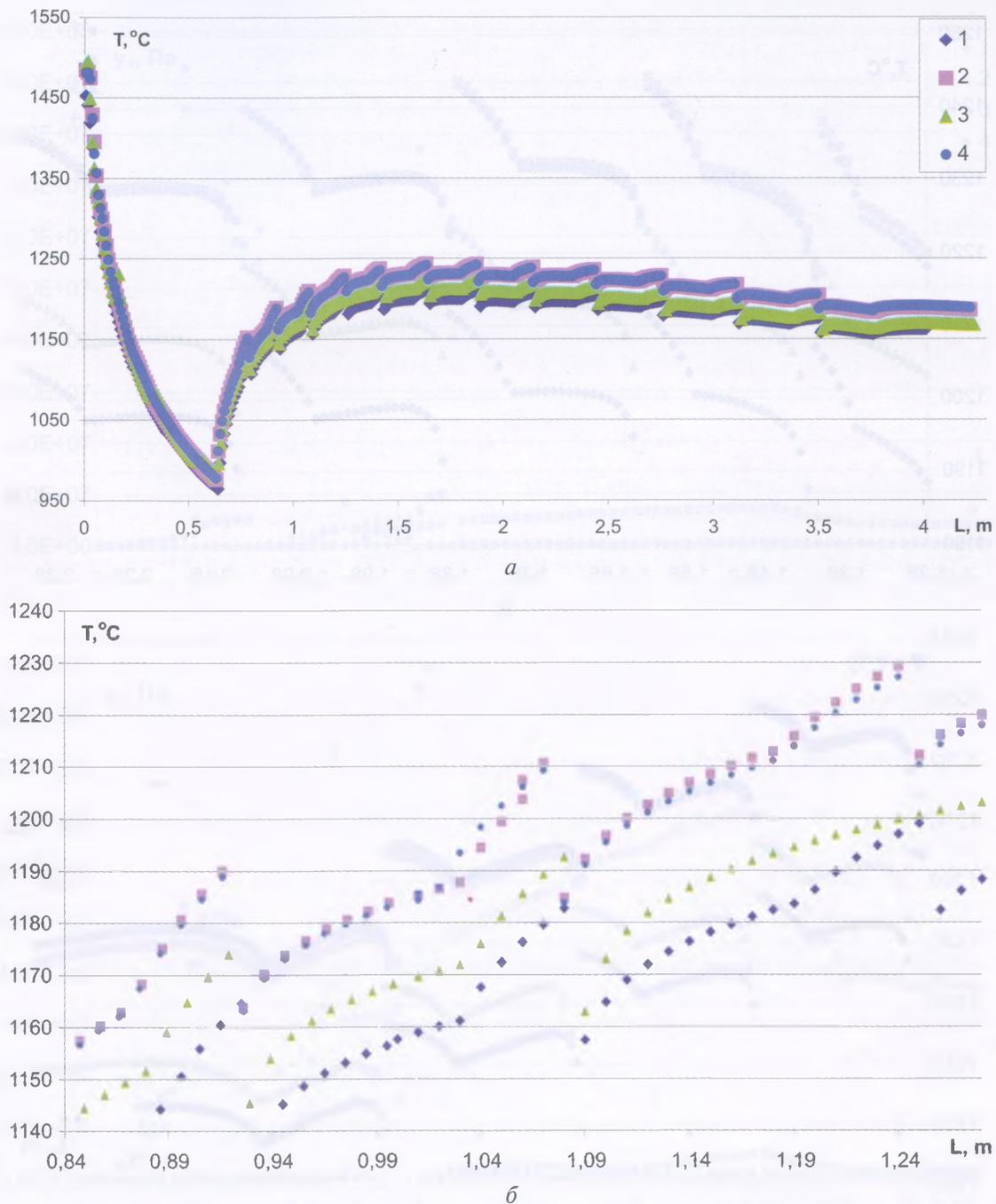


Рис. 3. Распределение температур в направлении точки А1 с координатами  $X=0,125$  м,  $Z=0,0025$  м вдоль стального слитка: а – в полной зоне охлаждения; б – в зоне охлаждения 1 + воздух (1 – 70К; 2 – 40Х; 3 – 40ХН3А; 4 – 2С45)

точки 0,0025 м (положение точки от края слитка), причем для всех четырех марок сталей кривые по форме и количественным значениям температуры накладываются друг на друга. При выходе из кристаллизатора температура увеличивается (рис. 3, б) для всех четырех марок сталей. Наиболее сильно она увеличивается для слитка из стали 40Х, самые низкие значения температуры наблюдаются для слитка из стали 70К. Температуры для слитка из сталей 20ХН3А и 2С45 имеют промежуточные значения по характеру подъема температуры, соответствующей слиткам из сталей 70К и 40Х.

При дальнейшем прохождении слитка от 0,84 до 1,28 м (рис. 4) от начального уровня (в промежуток входит ЗВО1 + воздух) наблюдается повышение температуры для всех марок стали без исключения. Наиболее сильно растет температура для слитка из стали 40Х. За счет изменения тепловых свойств охлаждающей среды, связанной с переходами слитка через воздушную прослойку, водяную рубашку, охлаждаемые и не охлаждаемые ролики, наблюдается пилообразный ход кривой температуры. На участках от 0,84 до 0,86 м, от 0,93 до 1,02 м, от 1,09 до 1,15 м наиболее высокая температура наблюдается

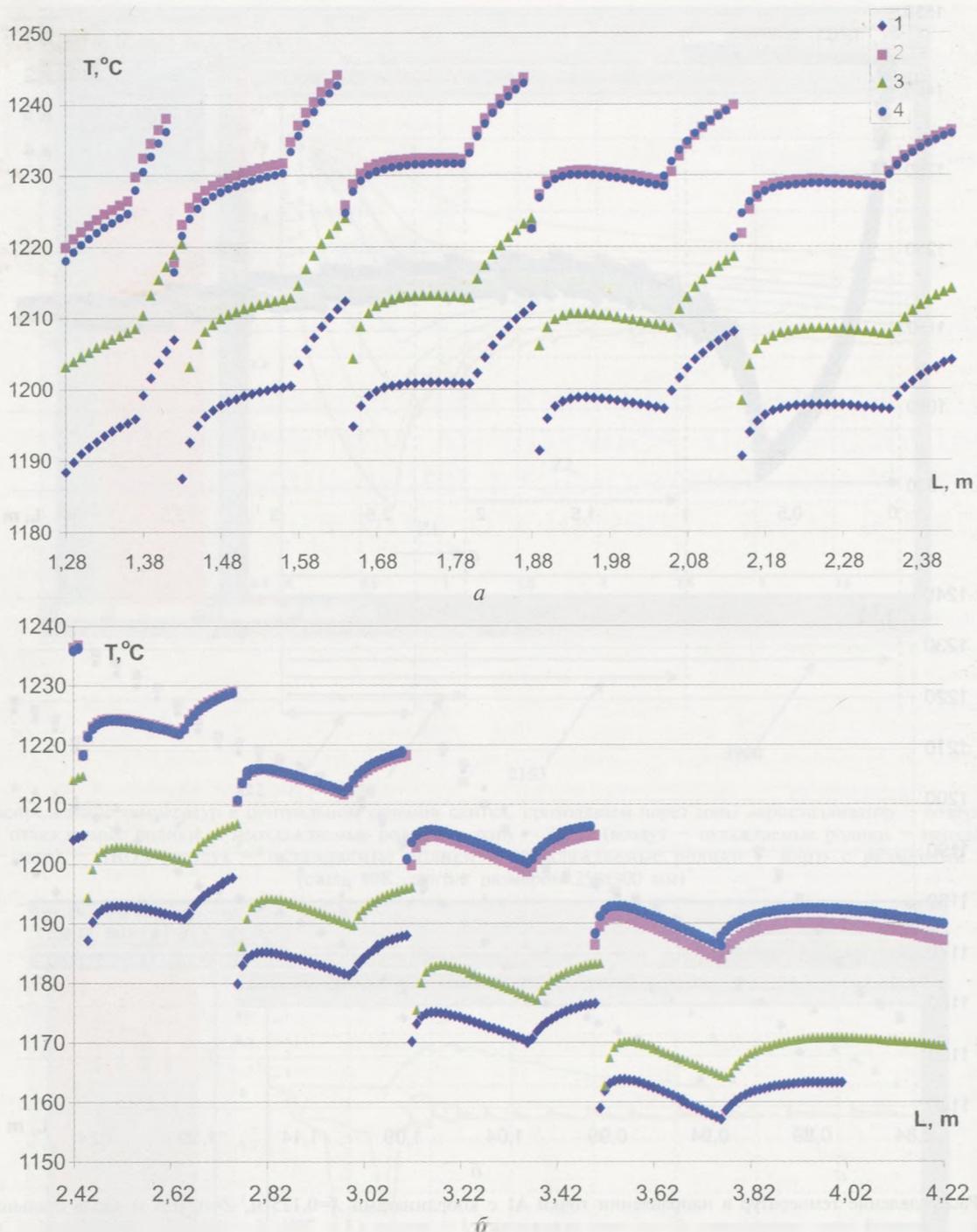


Рис. 4. Распределение температур в направлении точки А1 с координатами  $X=0,125$  м,  $Z=0,0025$  м вдоль стального слитка: а – в зоне охлаждения 2 + воздух; б – в третьей зоне охлаждения ЗВОЗ (1 – 70К; 2 – 40Х; 3 – 40ХН3А; 4 – 2С45)

для стали 20ХН3А. На остальных участках от 0,84 до 1,28 м температура для слитка из стали 2С45 выше, чем для слитка из стали 20ХН3А. Это свидетельствует о сложном характере температурных напряжений по всей длине слитка для используемых сталей. В зоне вторичного охлаждения I на одних участках температурные градиенты для стали 20ХН3А выше, чем для стали 2С45. На других участках наблюдается обратная картина. По-видимому, сложный характер изменения температуры связан с изменением модуля Юнга от температуры для этих сталей.

Рассчитанное распределение температур в слитке размером 250x300 мм было основой для определения растягивающих напряжений. На рис. 5, 6 представлены результаты расчетов напряжений для слитков. Для построения графических зависимостей использовано 1100 точек, что при рассмотрении графиков создает иллюзию непрерывности кривых. Анализ общего распределения растягивающих напряжений в слитке из сталей 70К, 40Х, 20ХН3А, 2С45 показал, что в зоне кристаллизатора по выделенной линии точки А1 ( $Z=0,0025$  м,  $X=0,125$  м) имеются некоторые

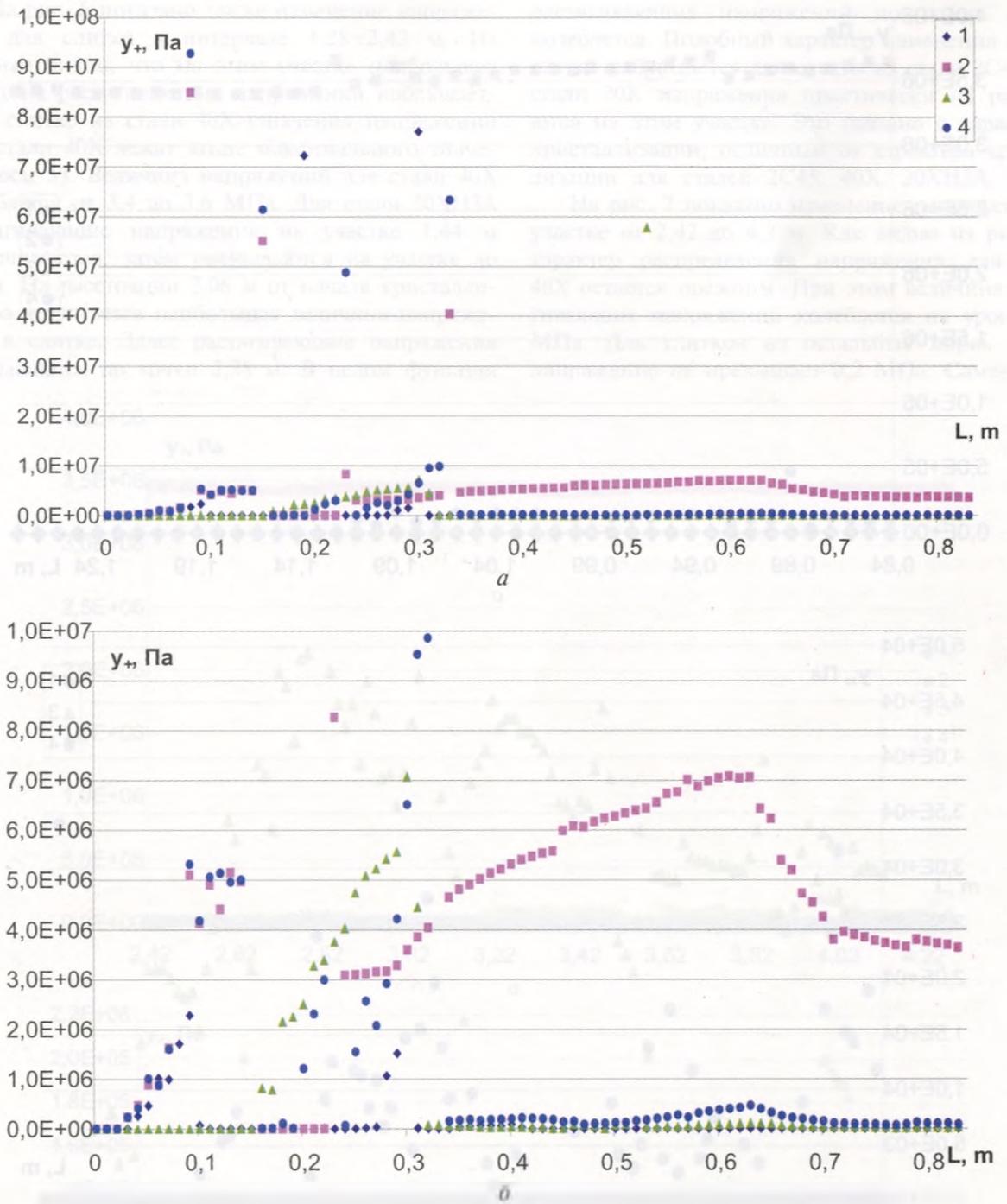


Рис. 5. Распределение растягивающих напряжений в направлении точки А1 с координатами  $X=0,125$  м,  $Z=0,0025$  м вдоль стального слитка в зоне «кристаллизатор + воздух» (а); детализация распределения растягивающих напряжений (б) (1 – 70К; 2 – 40Х; 3 – 40ХН3А; 4 – 2С45)

«выбросы» в значениях напряжений. Для стали 70К они лежат в интервале 70–80 МПа, для стали 2С45 величина растягивающих напряжений может доходить до 90 МПа, а также принимать значения 50 МПа. Эти напряжения характеризуют небольшие фрагменты слитка, которые, скорее всего, «залечиваются» ближайшими жидкими слоями. Они могут оказать какое-то влияние на дальнейшее развитие трещин. Однако на всем промежутке слитка растягивающие напряжения не превышают 10 МПа. На рис. 5 показана

зависимость (детализация зоны вторичного охлаждения) растягивающих напряжений на участке слитка от 0 до 0,84 м. Как видно из рисунка, для слитка из стали 40Х на участке от 0,3 до 0,8 м наблюдаются самые высокие значения напряжений, которые колеблются в основном от 3 до 7 МПа. Причем кривая напряжений идет с перегибом. Второе место по величине растягивающих напряжений занимает слиток из стали 2С45. Причем на участке от 0,15 до 0,3 м имеются «выбросы» по напряжениям для слитка из этой

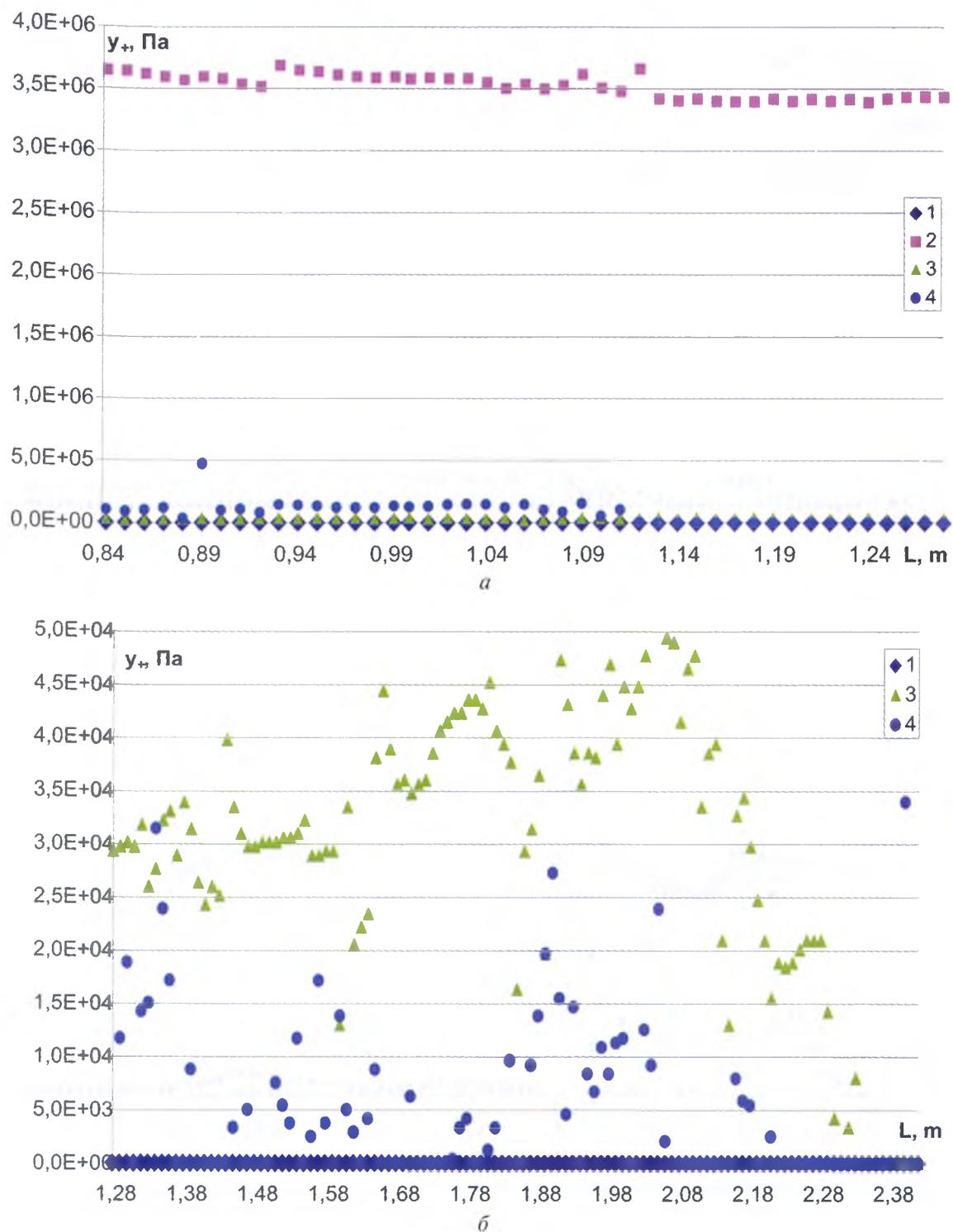


Рис. 6. Распределение растягивающих напряжений в направлении точки А1 с координатами  $X=0,125$  м,  $Z=0,0025$  м вдоль стального слитка в первой зоне охлаждения ЗВО1 (а); детализация распределения растягивающих напряжений во второй зоне охлаждения ЗВО2 (б) (1 – 70К; 2 – 40Х; 3 – 40ХН3А; 4 – 2С45)

стали, находящиеся на уровне напряжений в слитке из стали 40Х. На участке от 0,2 до 0,3 м наблюдаются «всплески» по величине напряжений для стали 20ХН3А. Самый низкий уровень растягивающих напряжений среди всех четырех марок стали был установлен расчетным путем для стали 70К.

На рис. 6 представлено изменение напряжений на участке от 0,84 до 1,28 м. Из рисунка видно, что

величина растягивающих напряжений для стали 40Х значительно превышает напряжения в слитке для сталей 70К, 2С45, 20ХН3А. На интервале 0,84–1,14 м наибольшая величина напряжений наблюдается для слитка из стали 2С45. За этой сталью по характеру развития напряжений идет сталь 20ХН3А. Однако значения растягивающих напряжений не превышают для всех марок сталей 3,5 МПа.

На рис. 6 показано также изменение напряжений для слитка в интервале 1,28–2,42 м. Из рисунка видно, что на этом участке наибольшая величина растягивающих напряжений наблюдается в слитке из стали 40Х (значения напряжений для стали 40Х лежат выше максимального значения оси  $У$ ). Величина напряжений для стали 40Х колеблется от 3,4 до 3,6 МПа. Для стали 20ХН3А растягивающие напряжения на участке 1,44 м увеличиваются, затем уменьшаются на участке до 1,5 м. На расстоянии 2,06 м от начала кристаллизатора достигается наибольшая величина напряжений в слитке. Далее растягивающие напряжения уменьшаются до точки 2,38 м. В целом функция

растягивающих напряжений по длине слитка колеблется. Подобный характер изменения напряжений наблюдается для слитка из стали 2С45. Для стали 70К напряжения практически не развиваются на этом участке. Это связано с характером кристаллизации, отличным от характера кристаллизации для сталей 2С45, 40Х, 20ХН3А.

На рис. 7 показано изменение напряжений на участке от 2,42 до 4,3 м. Как видно из рисунка, характер распределения напряжений для стали 40Х остается прежним. При этом величина растягивающих напряжений колеблется на уровне 3,5 МПа. Для слитков из остальных марок сталей напряжение не превышает 0,2 МПа. Самая боль-

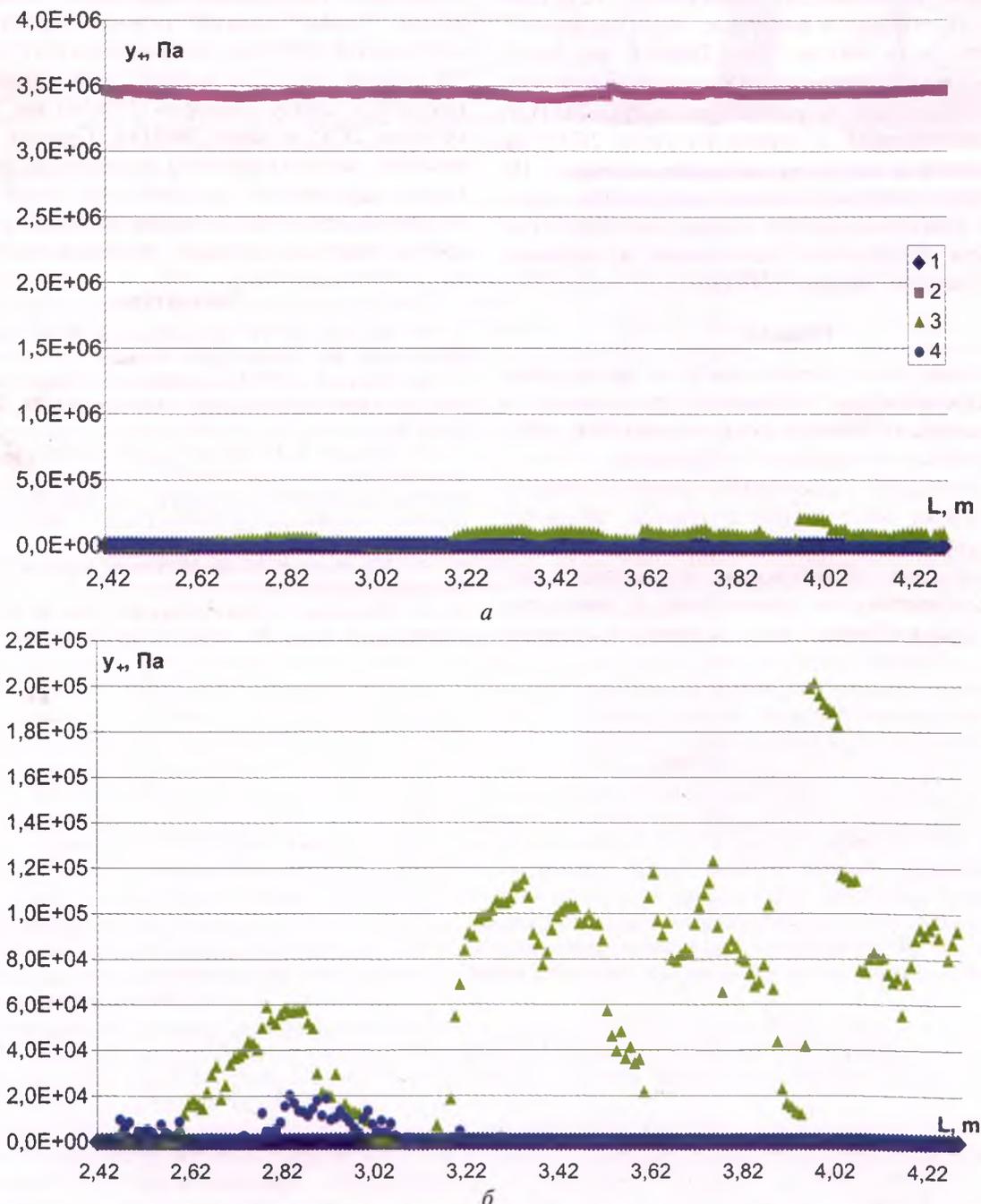


Рис. 7. Распределение растягивающих напряжений в направлении точки А1 с координатами  $X=0,125$  м,  $Z=0,0025$  м вдоль стального слитка в третьей зоне охлаждения ЗВОЗ (а); детализация распределения растягивающих напряжений (б) ( 1 – 70К; 2 – 40Х; 3 – 40ХН3А; 4 – 2С45)

шая величина напряжений на этом участке после стали 40Х у стали 20ХН3А. Причем из рисунка виден сложный характер разброса. Для слитка из стали 2С45 наибольшая величина растягивающих напряжений находится на интервале 2,72–3,12 м. Далее по слитку наблюдается минимальная величина напряжений.

Таким образом, на основе представленных расчетов был сделан вывод о том, что в заводских условиях на МНЛЗ-3 наиболее сильно развиваются растягивающие напряжения для стали 40Х. Наименьшие напряжения развиваются для слитка из стали 70К. Для слитков из сталей 2С45 и 20ХН3А на различных участках зон вторичного охлаждения развиваются напряжения, величина которых колеблется в интервале между напряжениями из стали 40Х и 70К. Причем на одних участках зоны вторичного охлаждения растягивающие напряжения в слитке из стали 20ХН3А больше напряжений в слитке из стали 2С45, на других участках ситуация меняется наоборот. На основе представленных данных предложены практические рекомендации по изменению характеристик зоны вторичного охлаждения в условиях технологической линии МНЛЗ-3.

### Выводы

На основе выполненных расчетов по исследованию процесса формирования напряжений в слитке размером 250х300 мм из сталей 70К, 40Х, 20ХН3А, 2С45 установлено следующее.

1. Основными факторами, определяющими формирование напряжений в слитке, являются температурные перепады на поверхности слитка при охлаждении, возникающие вследствие изменения коэффициентов теплоотдачи в зоне вторичного охлаждения за счет различного влияния

водяного и воздушного охлаждения, положения охлаждаемых и не охлаждаемых роликов. Показано, что для базового варианта МНЛЗ-3 в зоне вторичного охлаждения от 0 до 4,3 м наиболее сильно снижается температура слитка из стали 70К. Для стали 40Х наблюдается наибольший подъем температуры в зоне вторичного охлаждения. Температурные градиенты слитка из сталей 20ХН3А, 2С45 изменяются в интервале температурных градиентов, соответствующих слиткам из сталей 40Х и 70К.

2. Самый высокий уровень растягивающих напряжений наблюдается для слитка из стали 40Х. Уровень напряжений на различных участках зоны вторичного охлаждения изменяется сложным образом. Самый низкий уровень растягивающих напряжений наблюдается для слитка из стали 70К. На втором месте по уровню напряжений, возникающих в слитке размером 250х300 мм, находится сталь 2С45 и далее 20ХН3А. Причем на одних участках зоны вторичного охлаждения растягивающие напряжения в слитке из стали 20ХН3А больше напряжений в слитке из стали 2С45, а на других участках ситуация меняется наоборот.

### Литература

1. Евтеев Д. П., Колыбалов И. Н. Непрерывное литье стали. М.: Металлургия, 1984.
2. Чичко А. Н. Компьютерные системы моделирования физических процессов // Вестник БНТУ. 2003. № 2. С. 42–48.
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. Колосков М. М. Марочник сталей и сплавов. М.: Машиностроение, 2001.
5. Журавлев В. И., Николаева О. И. Машиностроительные стали. М.: Машиностроение, 1968.