



The results of the computer calculations of the temperature and stress fields, of the crystallizing steel ingot of size 300x400 mm from steel 20ХН3А at circular-flame and flat flame jet-type cooling, are presented. The comparative analysis of the stresses changes along the whole length of ingot for two types of jet-type cooling at the example of the machine of the continuous slugs casting BMZ.

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

ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ ТЕМПЕРАТУР И НАПРЯЖЕНИЙ В КРИСТАЛЛИЗИРУЮЩЕЙСЯ СЛИТКЕ ИЗ СТАЛИ 20ХН3А РАЗМЕРОМ 300Х400 ММ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЙ ОХЛАЖДЕНИЯ

В работах [1–3] были представлены математические модели термоупругости, на основе которых можно проводить расчет температур и напряжений в кристаллизующейся слитке. В моделях учитываются реальный размер слитка, теплопроводность, теплоемкость стали, зависящие от температуры, коэффициенты теплоотдачи на различных участках зоны вторичного охлаждения, радиус изгиба слитка, температура заливки и другие технологические характеристики процесса. В работах [4, 5] были представлены результаты расчетов температур и напряжений в слитке размером 250x300 мм из стали 18ХГТ в условиях плоскофакельного форсуночного охлаждения. Представляет научный и практический интерес оценить напряженное состояние слитка других размеров при использовании круглофакельного форсуночного охлаждения, которое является альтернативой плоскофакельному.

Цель настоящей работы – численный расчет температур и напряжений в слитках размером 300x400 мм из стали 20ХН3А при кругло- и плоскофакельном охлаждении и их сравнительный анализ.

На рис. 1 показаны схемы плоско- и круглофакельного охлаждения, а также поперечного среза рассчитываемого слитка. Пространственные размеры зоны вторичного охлаждения слитка соответствовали реально действующей машине непрерывного литья заготовок (МНЛЗ-3) Белорусского металлургического завода. В качестве исходных данных по технологии разлива стали 20ХН3А использовали температуру заливки 1534°С и скорость вытяжки слитка стали 0,5 м/мин. Для анализа температур и напряжений использовали продольное сечение XY, которое находилось на расстоянии $Z=0,04$ м от поверхности слитка (рис. 1). В расчетах были проанализированы следующие направления: $X=0,005$, $0,015$, $0,025$, $0,035$, $0,045$, $0,055$ м. Для этих направлений в случаях плоско-и круглофакельного

охлаждения проводили анализ температурного и напряженного состояний элементов слитка.

На рис. 2 представлено распределение температур в направлениях $X=0,005$ и $0,015$ м в рассчитанном слитке. Как видно из рисунка, в зоне вторичного охлаждения (ЗВО), приблизительно соответствующей интервалу $0,8 \leq L \leq 4$ м, наблюдается нелинейный, колебательный характер изменения температуры. Причем законы изменения температуры при кругло- и плоскофакельном охлаждении аналогичны. Однако при кругло-

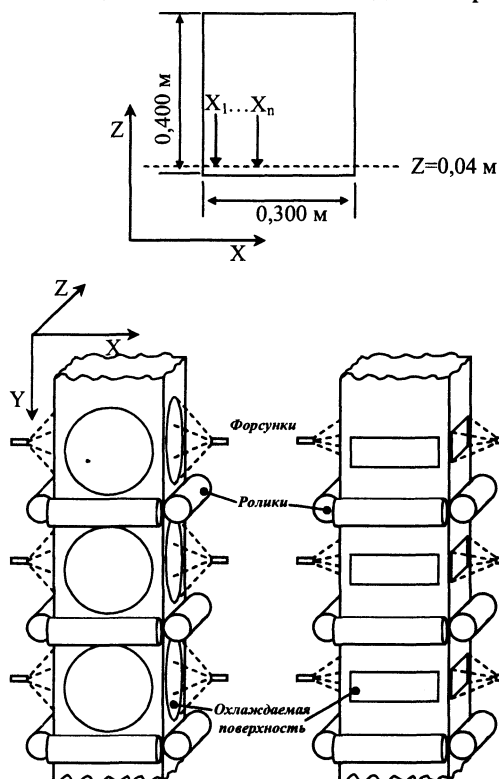


Рис. 1. Расчетная схема кругло- и плоскофакельного водяного охлаждения на участке зоны вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок размером 300x400 мм

факельном охлаждении слитка градиент температур меньше, чем при плоскофакельном охлаждении. При движении по направлению X в глубь слитка происходит сглаживание изменения температур в зоне $0,8 \leq L \leq 4$ м, что видно из рис. 2, б.

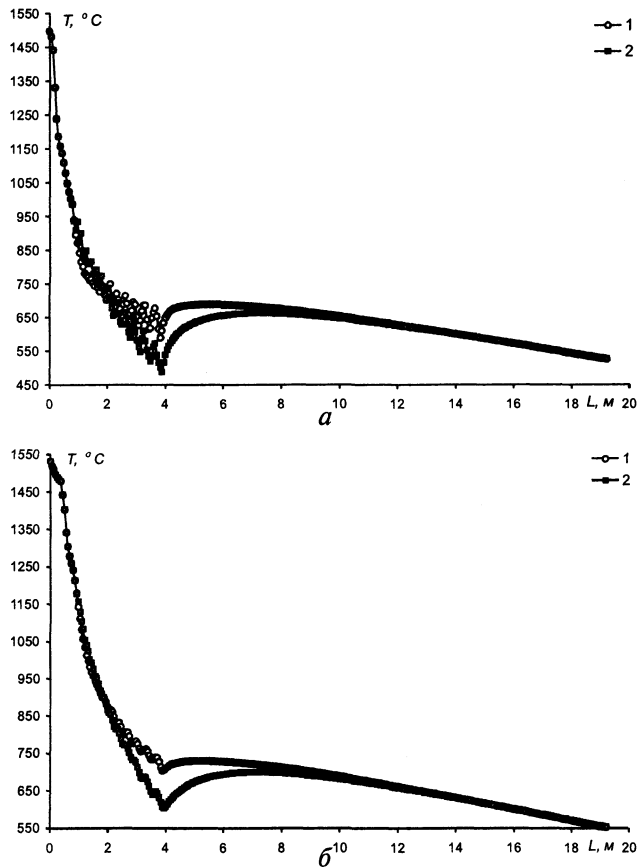


Рис. 2. Распределение температур в сечении $Z=0,04$ м для участка слитка размером 300×400 мм из стали 20ХН3А при круглофакельном (1) и плоскофакельном (2) форсуночном охлаждении ЗВО МНЛЗ: а - $X = 0,005$ м; б - $X = 0,015$ м

Аналогичная тенденция к сглаживанию градиента температур между пространственными точками в ЗВО наблюдается для направлений $X=0,025$ и $0,035$ м (рис. 3). Колебательный характер изменения температуры исчезает в направлениях $X=0,045$ и $0,055$ м (рис. 4). Для направлений в слитке, соответствующих интервалу $0,005 \leq X \leq 0,035$ м, характерно наличие переохлаждения на участке ЗВО. Причем при круглофакельном охлаждении степень переохлаждения меньше, чем при плоскофакельном (см. рис. 3). После прохождения зоны вторичного охлаждения температура слитка увеличивается для точек, находящихся вблизи поверхности слитка. В то же время внутренние точки слитка ($X \geq 0,045$ м) характеризуются обычным экспоненциальным уменьшением температуры. В целом изменение температуры по длине слитка более плавное при круглофакельном охлаждении слитка, чем при плоскофакельном.

На рис. 5–8 показаны результаты расчета напряжений в выделенных направлениях плоскости YX при кругло- и плоскофакельном охлаж-

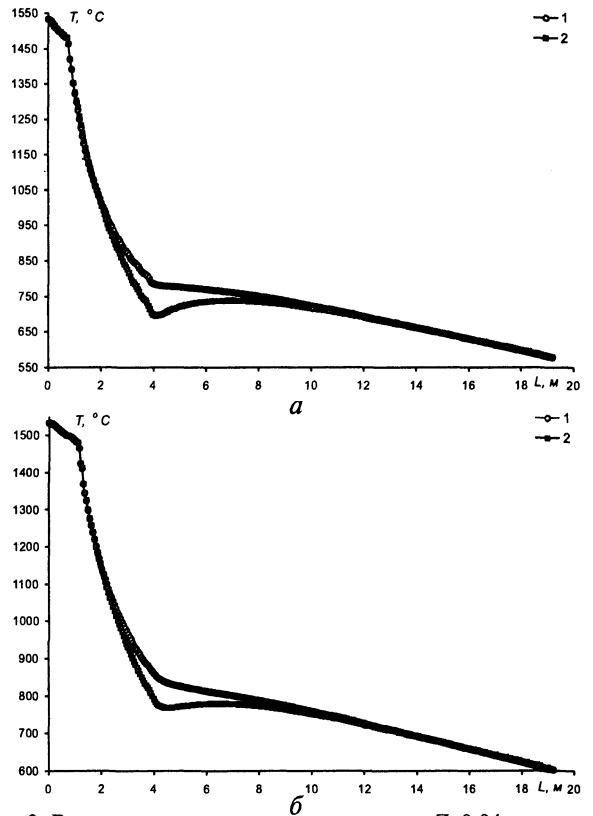


Рис. 3. Распределение температур в сечении $Z=0,04$ м для участка слитка размером 300×400 мм из стали 20ХН3А при круглофакельном (1) и плоскофакельном (2) форсуночном охлаждении ЗВО МНЛЗ: а - $X = 0,025$ м; б - $X = 0,035$ м

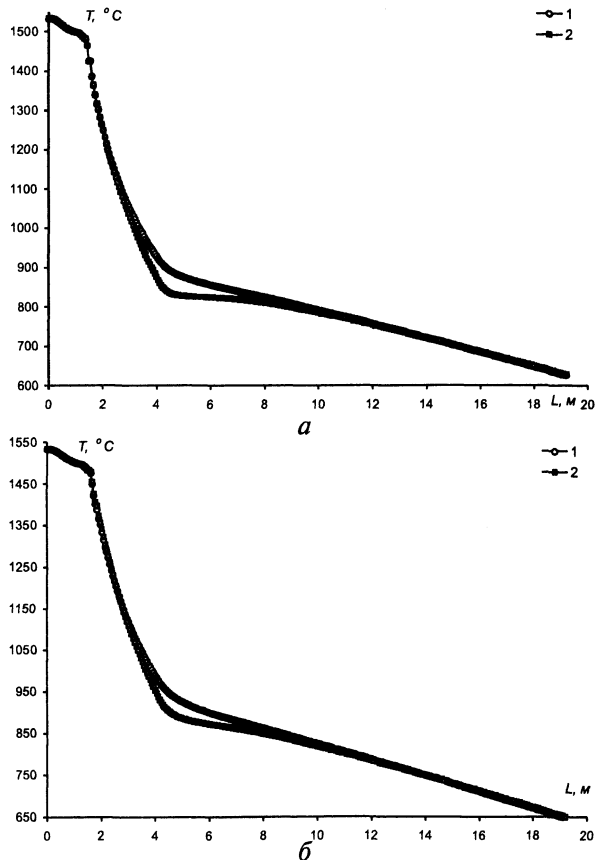


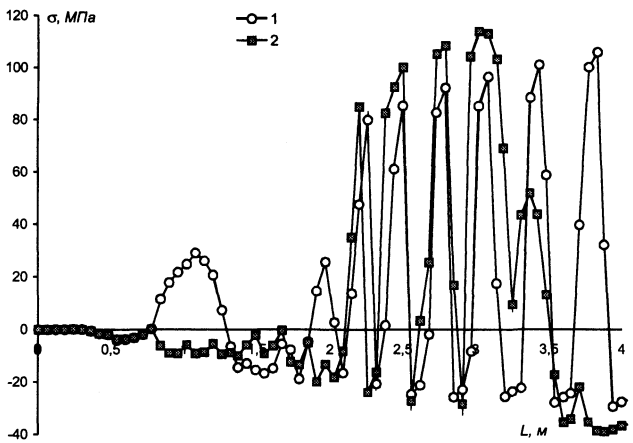
Рис. 4. Распределение температур в сечении $Z=0,04$ м для участка слитка размером 300×400 мм из стали 20ХН3А при круглофакельном (1) и плоскофакельном (2) форсуночном охлаждении ЗВО МНЛЗ: а - $X = 0,045$ м; б - $X = 0,055$ м

дении. Как видно из рис. 5, а, после выхода из кристаллизатора напряжения при кругло- и плоскофакельном охлаждении могут существенно различаться. На некоторых участках напряжения при круглофакельном охлаждении носят растягивающий характер, в то время, как при плоскофакельном охлаждении – сжимающий характер. В интервале $2 \leq L \leq 4$ м изменения напряжений носят колебательный характер (рис. 5, а) как при круглофакельном, так и при плоскофакельном охлаждении. Следует отметить, что амплитуда колебаний напряжений в слитке при круглофакельном охлаждении в интервале $2 \leq L \leq 3$ м меньше, чем при плоскофакельном. Различный характер растягивающих и сжимающих напряжений не позволяет однозначно определить, какой вид форсуночного охлаждения лучше на всем участке ЗВО. Однако дальнейшее изменение напряжений на участке от $4 \leq L \leq 16$ м показывает меньший уровень напряжений при круглофакельном охлаждении в сравнении с плоскофакельным (рис. 5, б). На участке $3,0 \leq L \leq 4,5$ м в направлении $X=0,015$ м четко прослеживается уменьшение напряжений в слитке при круглофакельном охлаждении в сравнении с плоскофакельным (рис. 6, а). При $L \geq 5$ м напряжения при круглофакель-

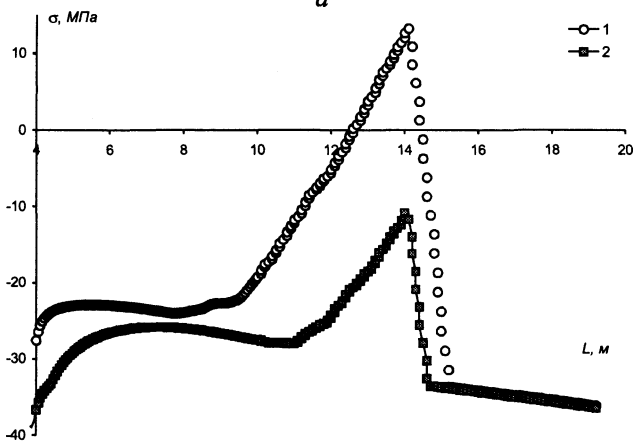
ном охлаждении уменьшаются быстрее, чем напряжения при плоскофакельном охлаждении (рис. 6, б). При этом максимальные значения напряжений находятся вблизи 40 МПа.

На рис. 7 представлены результаты сравнительного анализа напряжений при кругло- и плоскофакельном охлаждении для направлений $X=0,025$ м и $X=0,035$ м. При перемещении анализируемой точки внутрь слитка как бы нивелируются различия в напряжениях, возникающих при кругло- и плоскофакельном охлаждении, что повторяется для направлений $X=0,045$ и $0,055$ м (рис. 8).

На рис. 9 показано объемное изображение растягивающих и сжимающих напряжений слитка размером 300x400мм, охлаждаемого плоскими и круглыми форсунками для поперечного сечения $y=2$ м, находящегося в зоне вторичного охлаждения. Как видно из рисунка, круглофакельное форсуночное охлаждение слитка (рис. 9, а) «размывает» напряжения в направлении центра слитка, что позволяет снизить максимальный уровень напряжений с 80–100 МПа при плоскофакельном охлаждении (рис. 9, б), практически в 2 раза (30–40МПа) при круглофакельном.

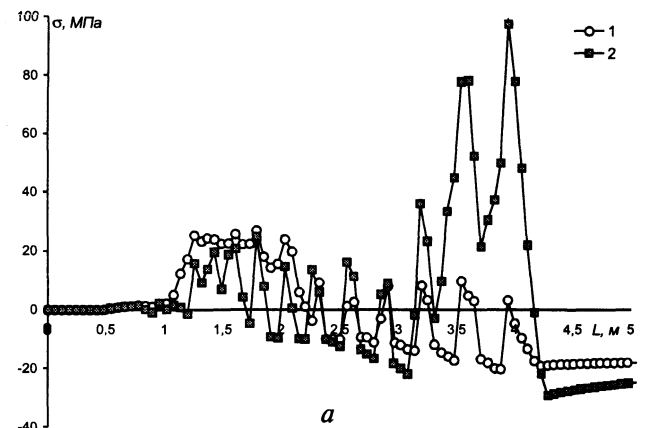


а

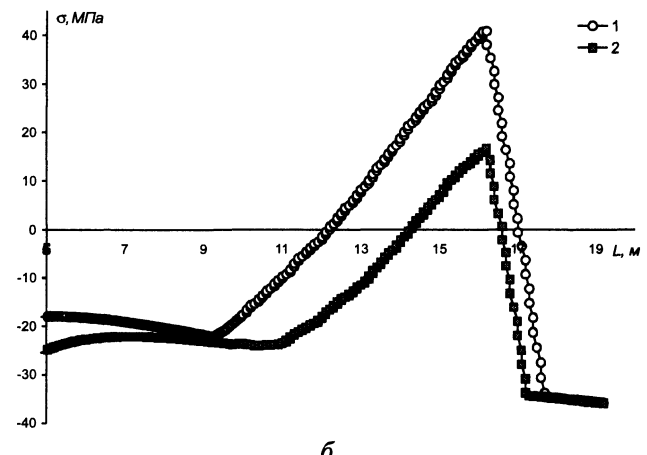


б

Рис. 5. Распределение продольных напряжений в сечении $Z=0,04$ м для участка слитка размером 300x400 мм из стали 20ХН3А при круглофакельном (1) и плоскофакельном (2) форсуночном охлаждении ЗВО МНЛЗ в направлении $X = 0,005$ м



а



б

Рис. 6. Распределение продольных напряжений в сечении $Z=0,04$ м для участка слитка 300x400 мм из стали 20ХН3А при круглофакельном (1) и плоскофакельном (2) форсуночном охлаждении ЗВО МНЛЗ в направлении $X = 0,015$ м

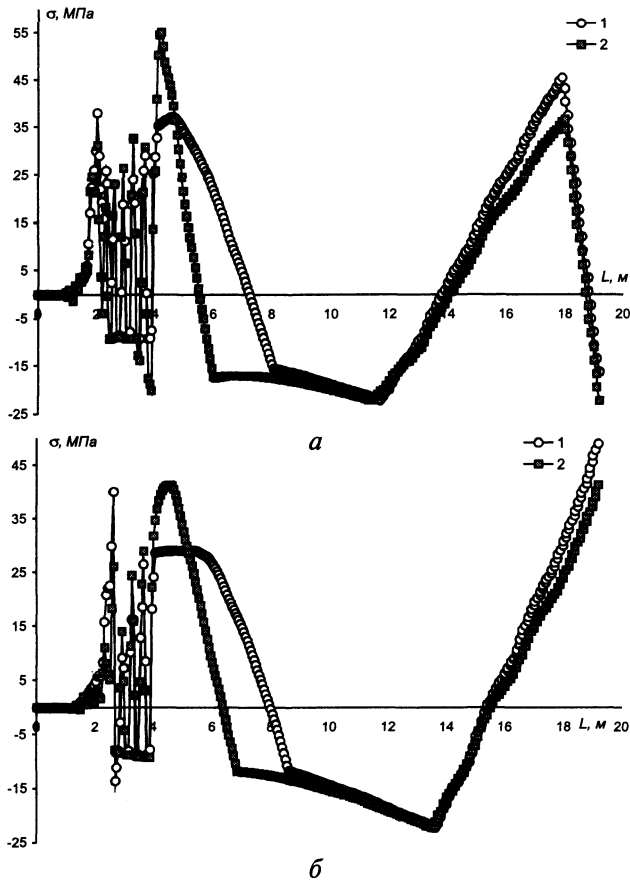


Рис. 7. Распределение продольных напряжений в сечении $Z=0,04$ м для участка слитка размером 300x400 мм из стали 20ХН3А при круглофакельном (1) и плоскофакельном (2) форсуночном охлаждении ЗВО МНЛЗ: а - $X = 0,025$ м; б - $X = 0,035$ м

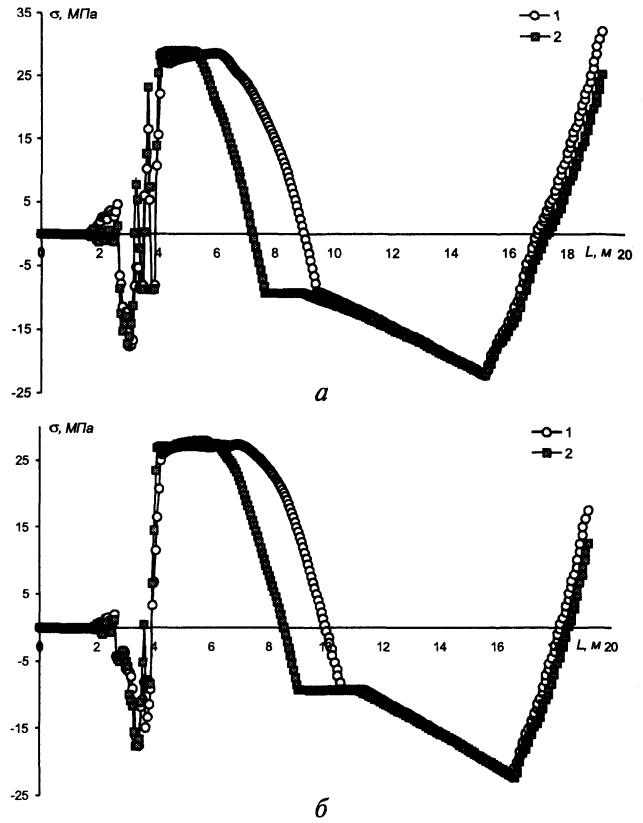


Рис. 8. Распределение продольных напряжений в сечении $Z=0,04$ м для участка слитка 300x400 мм из стали 20ХН3А при круглофакельном (1) и плоскофакельном (2) форсуночном охлаждении ЗВО МНЛЗ: а - $X = 0,045$ м; б - $X = 0,055$ м

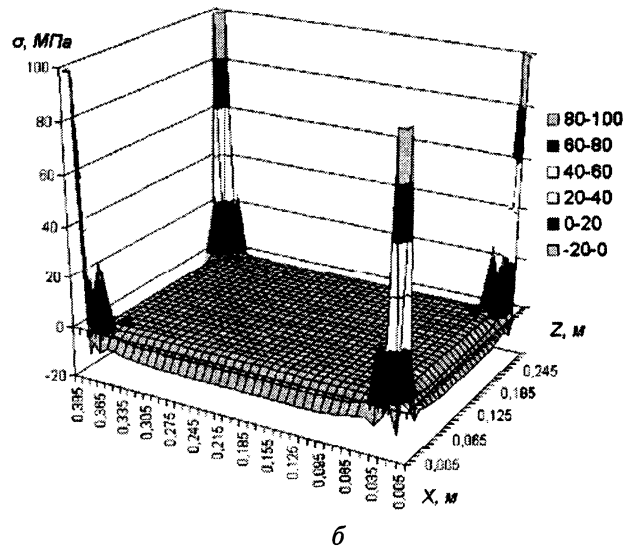
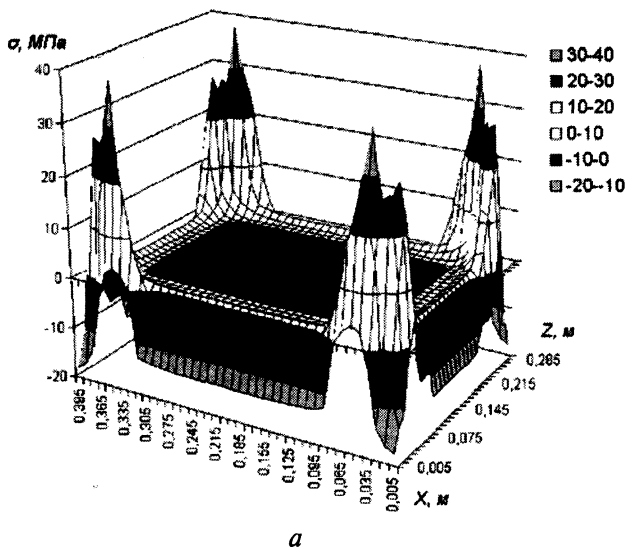


Рис. 9. Двумерное распределение сжимающих и растягивающих напряжений в поперечном сечении $Y=2$ м по длине слитка размером 300x400 мм из стали 20ХН3А при круглофакельном (1) и плоскофакельном (2) охлаждении

Таким образом, проведенные расчеты слитков показывают, что круглофакельное охлаждение сглаживает градиенты температур и напряжений по сравнению с плоскофакельным. Причем чем ближе анализируемая точка к центру слитка, тем меньше различия в напряжениях и температурах

в ней при кругло- и плоскофакельном охлаждении. И, наоборот, для точек, находящихся вблизи поверхности слитка, различие в значениях температур и напряжений может быть велико, что отражается и на характере изменения температур и напряжений по всей длине слитка. На

основе проведенных исследований для машины непрерывной разливки стали (МНЛЗ-3, РУП "БМЗ") подготовлены технологические инструкции по расходам воды в ЗВО при замене плоских форсунок на круглые с целью снижения характеристик трещиноломкости слитка и повышения качества получаемых промышленных слитков.

Литература

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. Чичко А.Н., Андрианов Н.В., Демин А.В., Кукуй Д.М. и др. Численное моделирование распределения температурного поля в кристаллизующемся слитке из стали 18ХГТ на основе компьютерной системы «ПроНПС» // Литье и металлургия. 2004. №2 (спец.выпуск). С. 111–116.

5. Чичко А.Н., Андрианов Н.В., Демин А.В. и др. Компьютерное моделирование на основе программы «ПроНПС-2» продольных напряжений в слитке, охлаждаемом плоскофакельными форсунками // Литье и металлургия. 2004. №2. С. 5–13.