На правах рукописи



Краюшкин Николай Александрович

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ И РАЗРАБОТКА РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ОХЛАЖДЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ

Специальность: 05.16.02 - «Металлургия чёрных, цветных и редких металлов»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2018

Диссертационная работа выполнена на кафедре «Энергоэффективные и ресурсосберегающие промышленные технологии» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Научный руководитель:
к.т.н., доцент,
доцент кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий
НИТУ «МИСиС» — **Шатохин Константин Станиславович**

Официальные оппоненты:
д.т.н., профессор, заведующий кафедрой тепломассообменных процессов и установок
НИУ «МЭИ» — **Гаряев Андрей Борисович**

к.ф.-м.н., Генеральный директор
ООО «КОМАС» — **Курносов Владимир Владимирович**

Ведущая организация: **ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»**

Защита диссертации состоится **«31» мая 2018 г.** в **10:00** часов на заседании Диссертационного совета Д 212.132.02 на базе Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д.6, ауд. 305.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте Национального исследовательского технологическогоуниверситета «МИСиС» – http://misis.ru.

Отзывы на автореферат диссертации (в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения) просьба отправлять по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д.4, Учёный совет. Копии отзывов можно присылать на электронную почту: misistlp@mail.ru.
Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Учёный секретарь диссертационного совета Д 212.132.02,
кандидат технических наук, доцент — А.В. Колтыгин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Актуальность работы обусловлена тем, что важную роль в современном производстве стальных заготовок круглого сечения играет непрерывная разливка стали на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). В России около 70 % стали разливается на МНЛЗ, что в 2017 году составило около 49,5 млн. тонн. При этом потребность в уменьшении дефектов в получаемых цилиндрических непрерывнолитых заготовках обусловлена требованиями современной металлургической промышленности и является важным вопросом отрасли. Уменьшение таких дефектов, как наружные и внутренние трещины, даже в 0,1 % заготовок, получаемых непрерывным литьём, позволит дополнительно получить около 50 000 тыс. тонн бездефектной стали в год. В связи с этим весьма актуальной является задача совершенствования оборудования МНЛЗ и технологии разливки, обеспечивающих уменьшение количества дефектов в получаемых заготовках, при сохранении высокой производительности агрегатов. В нашей стране ведутся широкие экспериментальные и теоретические исследования по совершенствованию тепловой работы МНЛЗ, основоположниками которых являются сотрудники отдела непрерывной разливки стали ЦНИИчермет им. И.П. Бардина. Проводимые исследования способствуют решению практических задач увеличения производительности и выхода годного металла без увеличения количества производимых заготовок.

В диссертационной работе на основе математического моделирования процесса охлаждения проводится поиск рациональных режимов охлаждения заготовок круглого поперечного сечения из высококачественных и специальных марок сталей, выявляются теплотехнические требования к совершенствованию их непрерывной разливки с целью разработки рациональных режимов охлаждения, позволяющих избежать возникновения наружных и внутренних дефектов при производстве заготовок. Особое внимание уделяется правильной организации тепловых процессов в зоне вторичного охлаждения (ЗВО).

Одной из основных задач для уменьшения количества дефектов в непрерывнолитых заготовках является ликвидация различного рода трещин. Причиной возникновения и развития этих трещин являются напряжения в формирующейся заготовке, превышающие предел прочности металла. Появление этих напряжений в основном связано с характером изменяющегося во времени температурного поля оболочки заготовки. Таким образом, вероятность возникновения дефектов, особенно внутренних и наружных трещин в непрерывнолитых заготовках, во многом зависит от условий их охлаждения.

Актуальной задачей является совершенствование процессов охлаждения заготовки в зоне вторичного охлаждения, направленных на интенсификацию затвердевания и уменьшение дефектов, возникающих в процессе непрерывной разливки. ЗВО должна выполнять две основные функции – обеспечивать высокий равномерный теплоотвод без возникновения существенных термических напряжений и полное затвердевание заготовки. При этом распределение интенсивности теплоотвода по периметру и длине заготовки должно обеспечить отсутствие опасных напряжений, которые могли бы привести к появлению трещин. Особенно важно обеспечить монотонное снижение температуры по поверхности заготовки в зоне вторичного охлаждения и на воздухе. Также важно обеспечить равномерное распределение интенсивности теплоотвода по периметру заготовки, чтобы минимизировать возникающие в процессе охлаждения термические напряжения. Тепловой режим ЗВО, согласованный с технологическими параметрами непрерывной разливки, такими как скорость разливки, физические свойства стали, размер заготовки, должен обеспечивать на выходе полностью затвердевшую заготовку без внутренних и внешних дефектов, таких как наружные и внутренние осевые и поперечные трещины, пористость, овальность профиля поперечного сечения.

Тепловые режимы играют крайне важную роль для получения бездефектных заготовок круглого сечения, которые особенно склонны к образованию овальности профиля поперечного сечения. Именно организация рациональных тепловых режимов при формировании заготовок круглого сечения поможет избежать овальности профиля поперечного сечения, а также обеспечить получение заготовок без внутренних и наружных трещин.

Цель работы

Целью работы является разработка рациональных режимов охлаждения в МНЛЗ на основе исследования теплового состояния непрерывнолитых заготовок.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи

1. Анализ состояния, основных проблем и перспектив развития непрерывной разливки стальных заготовок круглого сечения.
2. Изучение современных режимов охлаждения заготовок круглого сечения при непрерывной разливке.
3. Моделирование охлаждения заготовок круглого сечения при непрерывной разливке с учётом внутренних источников теплоты и развитой двухфазной зоны.

4. Исследование влияния режимов охлаждения на величины термических напряжений, возникающих при затвердевании стальных заготовок.

5. Разработка рекомендаций по организации рациональных режимов для получения бездефектных заготовок круглого сечения из различных марок сталей.

Научная новизна

1. Разработана математическая модель процесса охлаждения при непрерывной разливке стали, учитывающая влияние неоднородности граничных условий на формирование температурных полей и возникающих термических напряжений в затвердевающей заготовке, отличающаяся способом поэлементного присвоения численных значений теплофизическим параметрам при учете скрытой теплоты кристаллизации в развитой двухфазной зоне.

2. Разработана модель для расчёта возникающих при непрерывной разливке температурных полей и термических напряжений, учитывающая перетоки теплоты между секциями водовоздушного охлаждения по периметру и в поперечном сечении заготовки.

3. Оценено влияние неоднородности граничных условий на возникающие термические напряжения в процессе непрерывной разливки круглой заготовки с учетом перетоков теплоты.

Практическое значение полученных результатов

1. Обоснована рациональная скорость разливки и рациональный режим охлаждения заготовок из коррозионностойких марок сталей в зоне вторичного охлаждения с коэффициентами теплоотдачи α=400, 300 и 225 Вт/(м^2·К) в первой, второй и третьей секциях вторичного охлаждения соответственно.

2. Получены значения термических напряжений, возникающих при различных режимах охлаждения заготовки в случае симметричного и асимметричного теплоотвода от поверхности металла с учетом перетоков теплоты, достигающие значений от 630 до 1100 МПа в зависимости от интенсивности охлаждения в секциях ЗВО.

3. Предложены решения по совершенствованию технологии охлаждения заготовок из коррозионностойких марок сталей в зоне вторичного охлаждения в процессе непрерывной разливки круглой заготовки.

4. Рассчитаны и обоснованы необходимые расходы воды и плотности орошения водовоздушной смеси для реализации рационального режима охлаждения.

Личный вклад автора

В диссертации представлены результаты исследований, полученные лично автором на кафедре Энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий НИТУ «МИСиС». Личный вклад автора в настоящую работу заключается в разработке методологии и математической модели охлаждения непрерывнолитых заготовок, проведении расчётов, анализе, обобщении и опубликовании полученных результатов.

Апробация работы

Основные положения диссертации доложены в ходе трёх научно-практических конференций: 1) 66-ые Дни науки МИСиС, 2011; 2) VII международная научно-практическая конференция «Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология», НИТУ «МИСиС», 2014; 3) XII Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Энергосбережение. Экология. Новые технологии», СТИ «МИСиС», 2015.

Основные результаты диссертационного исследования также доложены на ОАО «МЗ «Электросталь» и признаны целесообразными для внедрения и дальнейшего применения в работе.

По теме диссертации опубликовано 3 научные статьи в журнале «Известия Вузов. Чёрная металлургия», входящем в перечень ВАК.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, 2 приложений и списка использованных источников, состоящего из 104 источников. Изложена на 161 странице, содержит 14 таблиц и 55 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Аналитический обзор литературы

В первой главе подробно описан принцип работы основных узлов машин непрерывного литья заготовок: кристаллизатора и зоны вторичного охлаждения, а также детально освещаются современные проблемы технологии непрерывной разливки круглых стальных заготовок. Приводится список основных дефектов стальной непрерывнолитой заготовки с описанием спосо-

бов их предотвращения. Проводится анализ современных тенденций развития процессов непрерывной разливки стали.

Глава 2. Цели, задачи и методы исследования теплового состояния охлаждаемых заготовок круглого сечения в установках непрерывной разливки стали

Во второй главе подробно описаны цели, задачи и методы исследования режимов охлаждения заготовок круглого сечения в установках непрерывной разливки стали на промышленных предприятиях, на основе которых проводились исследования. Также подробно представлена математическая модель охлаждения при непрерывной разливке заготовок круглого сечения с учётом внутренних источников теплоты и развитой двухфазной зоны, которая применялась при изучении тепловых процессов, происходящих при непрерывной разливке стальных заготовок круглого сечения.

Для описания процесса охлаждения за основу принимается дифференциальное уравнение энергетического баланса с внутренними источниками теплоты, особенностью которого является учёт выделения теплоты кристаллизации. В общем виде уравнение энергии при наличии внутренних источников тепла записывается в виде:

$$\rho \cdot \left(\frac{dh}{d\tau} \right) = div\ (\lambda \cdot gradT\ ) + q_v, \qquad (1)$$

где $\frac{dh}{d\tau}$ - полная (субстанциальная) производная массовой энтальпии по времени, Дж/(кг·с);

q_v – плотность внутренних источников теплоты, Вт/м^3;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

ρ – плотность металла, кг/м^3;

T – температура, К.

В соответствии с принятой моделью, решается уравнение теплопроводности:

$$C(T) \cdot \rho(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = div\ (\lambda(T) \cdot gradT\ ) + q_v\ , \qquad (2)$$

где $C(T)$ – удельная массовая теплоёмкость, Дж/(кг·К),

t – время процесса затвердевания, с.

Учёт зависимости от температуры теплофизических характеристик $C(T)$, $\lambda(T)$ приводит к сугубо нелинейной постановке задачи нестационарной теплопроводности.

В разработанной математической модели теплопроводности тепловыделение в двухфазной зоне учитывается путём присвоения численных значений теплофизическим параметрам с учётом зависимости относительной объёмной доли жидкой и твёрдой фазы от температуры. При этом вводится понятие эффективной теплоёмкости $\overline{C}$, учитывающей выделение скрытой теплоты кристаллизации.

В общем виде эффективную теплоёмкость можно записать следующим образом:

$$\overline{C}(T)_э = \begin{cases} C_{ж}, & при\ T > T_л \\ C(T) - q_{кр} \cdot \left(\dfrac{\partial \psi}{\partial T} \right), & при\ T_c < T < T_л, где \quad \psi = \dfrac{T_л - T}{T_л - T_c} \\ C_T, & при\ T < T_c \end{cases} \qquad (3)$$

где $C_Ж$ – удельная теплоемкость металла в жидкой фазе, Дж/(кг·К);

$C_Т$–удельная теплоемкость металла в твердой фазе, Дж/(кг·К);

$T_л$ – температура ликвидус для данной марки стали, К;

$T_с$ – температура солидус для данной марки стали, К;

$q_{кр}$ – скрытая теплота кристаллизации, Дж/кг.

Математическая модель позволяет проводить исследование процессов затвердевания заготовок двух простых профилей: цилиндрического и прямоугольного. Предполагается симметрия распределения температурного поля относительно оси заготовки. Для цилиндрических (круглых) сортовых заготовок осевая симметрия обусловлена их формой, поэтому возникает одномерная сугубо нелинейная задача теплопроводности.

Нелинейное дифференциальное уравнение теплопроводности в цилиндрических координатах:

$$C \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\lambda(T)}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \lambda(T) \cdot \left(\frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right), \qquad (4)$$

где C – удельная теплоёмкость стали, Дж/(кг·К),

r – текущий радиус заготовки, м;

ρ – плотность затвердевшего металла, кг/м^3;

t– время процесса затвердевания, с;

T – температура твёрдой фазы, К;

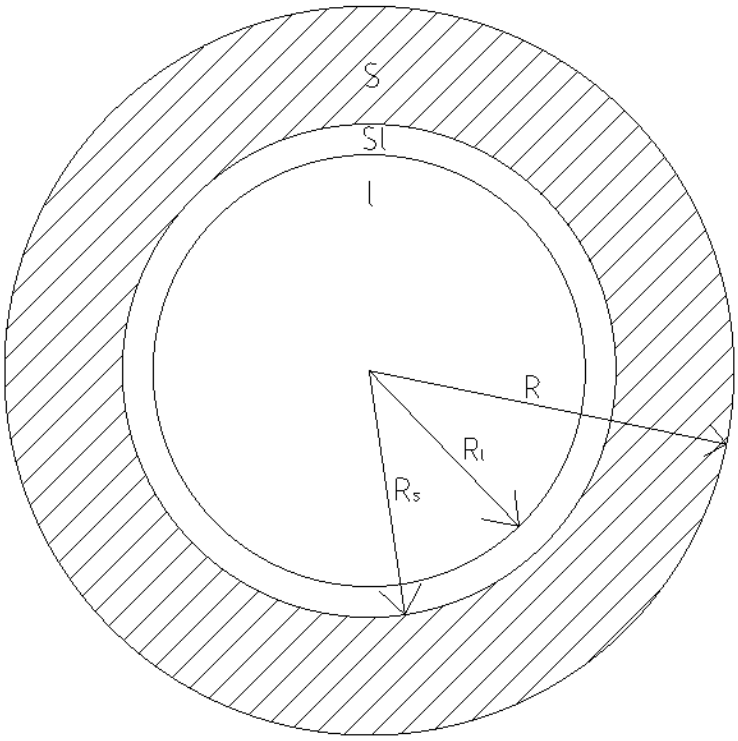
φ – угловая координата, рад.

На границе расплава и корочки затвердевшего металла

$$T(r,t)_{rl} = T_{л}, \quad (5)$$

где $T_л$ – температура плавления жидкого металла, К;

$T\,(r,t)_{rl}$ – температура жидкой фазы на границе с двухфазной областью, К.



R – радиус заготовки, R_S– радиус внутренней затвердевшей области, R_l– радиус области жидкой фазы; S – затвердевшая область, *Sl* – область двухфазного состояния, *l* – область жидкой фазы

Рис. 1 – Поперечное сечение непрерывнолитой заготовки в процессе затвердевания

Уравнение теплового баланса на поверхности заготовки:

$$-\lambda(T,r)\cdot\left(\frac{\partial T(r,t)}{\partial r}\right)_{r=R} = q^{0}(t), \quad (6)$$

где $q^0(t)$ – плотность теплового потока на поверхности затвердевшей корочки металла, Вт/м^2.

Плотность отводимого от внешней поверхности заготовки в окружающее пространство теплового потока рассчитывается по формуле:

$$q^0(t) = \alpha\cdot(T(R,t) - T_{\text{охл}}) + \sigma_0\cdot\varepsilon_{\text{пр}}\cdot(T^4(R,t) - T_0^4), \quad (7)$$

где $T(R,t)$ – температура наружной поверхности затвердевшей корочки, К;
$\varepsilon_{пр}$ – приведённая степень черноты;
$T_{охл}$ – температура охлаждающей среды, К;
T_0 – температура окружающей среды, К;
α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2·К);
σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана, равная 5,67·10^{-8}, Вт/(м^2·К^4).

Преобразуем уравнение (4), разделив на $\lambda(T)$ левую и правую части уравнения, к следующему виду:

$$\frac{1}{a(T)}\cdot\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial T}{\partial r}+\frac{\lambda'}{\lambda(T)}\cdot\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)^2+\frac{1}{r^2}\cdot\frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \qquad (8)$$

где λ' – производная от коэффициента теплопроводности по температуре, Вт/(м·К^2);
a – коэффициент температуропроводности, м^2/с;
r – радиус заготовки, м;
x – продольная координата, м.

В дальнейшем уравнение решается по конечно-разностной аппроксимации для внутренних узлов по схеме Кранка-Николсона, которая имеет вид:

$$\frac{1}{a(T_j^n)}\cdot\frac{T_j^{n+1}-T_j^n}{\Delta t}=\frac{1}{2}\cdot\frac{(T_{j+1}^{n+1}-2\cdot T_j^{n+1}+T_{j-1}^{n+1})+(T_{j+1}^n-2\cdot T_j^n+T_{j-1}^n)}{\Delta r^2}+\frac{T_{j+1}^n-T_{j-1}^n}{2\cdot j\cdot\Delta r^2}+$$

$$+\frac{\lambda'(T_j^n)}{\lambda(T_j^n)}\cdot\frac{\left(T_{j+1}^n-T_{j-1}^n\right)^2}{4\cdot\Delta r^2}. \qquad (9)$$

Глава 3. Исследование теплового состояния при затвердевании в процессе непрерывной разливки заготовок круглого сечения из высококачественных марок сталей в кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения (ЗВО)

В третьей главе подробно описаны теоретические и экспериментальные исследования, проведённые в зоне вторичного охлаждения и на участке неконтролируемого охлаждения на воздухе в машине непрерырывного литья заготовок и приведены их результаты. Проводится сравнительный анализ полученных данных с существующими режимами охлаждения и выявляются рациональные режимы для процесса непрерывной разливки круглых сталь-

ных заготовок, реализация которых позволит получать заготовки с минимальным количеством внутренних и наружных дефектов.

Для расчётов в ЗВО брались данные, актуальные для машины непрерывного литья заготовок диаметром 250 мм на ОАО «МЗ «Электросталь». Зона вторичного охлаждения имеет длину 3,59 м и разделена на 3 секции. Длина первой секции – 0,38м, второй – 1,17 м, третьей – 2,04 м. Для всех секций предусмотрено водовоздушное охлаждение с помощью форсунок. Интенсивность охлаждения в каждой секции ЗВО характеризуется коэффициентами теплоотдачи 500, 350 и 200 Вт/(м^2·К) соответственно.

Расчетами, согласно разработанной математической модели, определены параметры охлаждения заготовки в ЗВО при скоростях разливки υ=0,7; 0,65 и 0,6 м/мин.

Таблица 1– Параметры охлаждения заготовки в ЗВО при скорости разливки υ=0,7 м/мин

№ секции	Длина секции, м	Температура поверхности заготовки на выходе, °С	Толщина корочки на выходе, мм	Коэффициент теплоотдачи в секции, Вт/(м^2·К)
1	0,38	958	29	500
2	1,17	876	46,5	350
3	2,04	850	71,5	200

Таблица 2– Параметры охлаждения заготовки в ЗВО при скорости разливки υ=0,65 м/мин и υ=0,6 м/мин

№ секции	Длина секции, м	Температура поверхности заготовки на выходе из секции, °С		Толщина корочки на выходе из секции, мм		Коэффициент теплоотдачи в секции, Вт/(м^2·К)
		υ=0,65 м/мин	υ=0,6 м/мин	υ=0,65 м/мин	υ=0,6 м/мин	
1	0,38	940	912	31	34	500
2	1,17	856	825	50	54	350
3	2,04	829	798	76	84	200

Сравнительные графики изменения температуры поверхности заготовки, а также схематичное положение жидкометаллической лунки для скоростей υ=0,7 м /мин, 0,65 м/мин и 0,6 м/мин представлены на рисунках 2 и 3 соответственно.

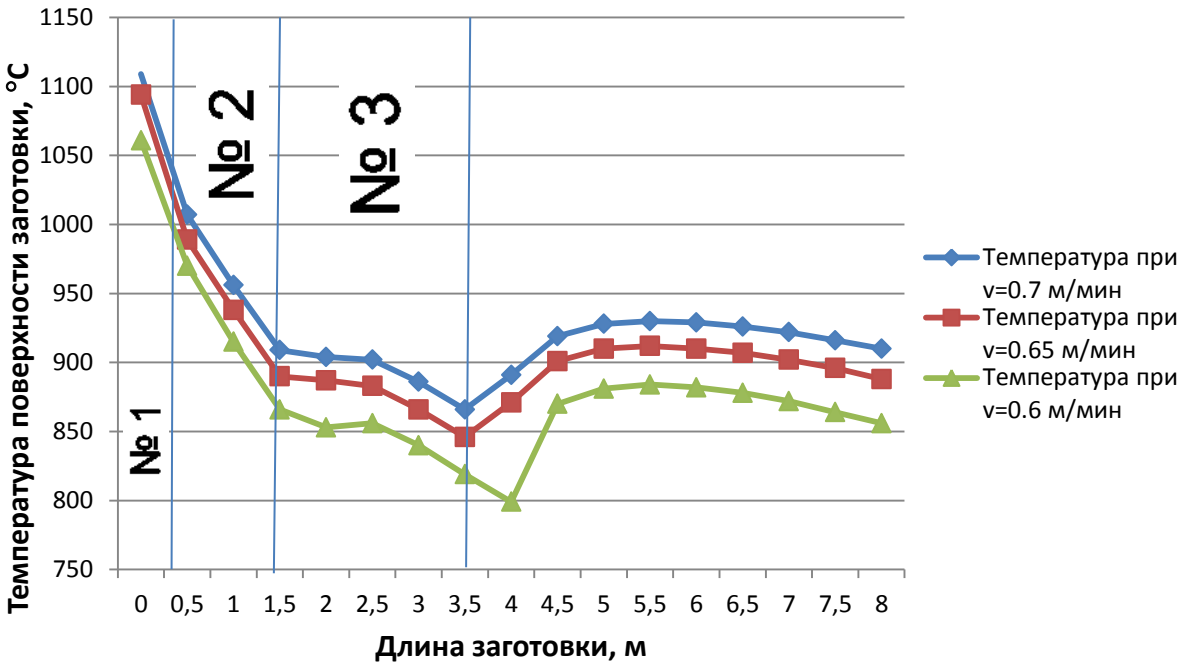
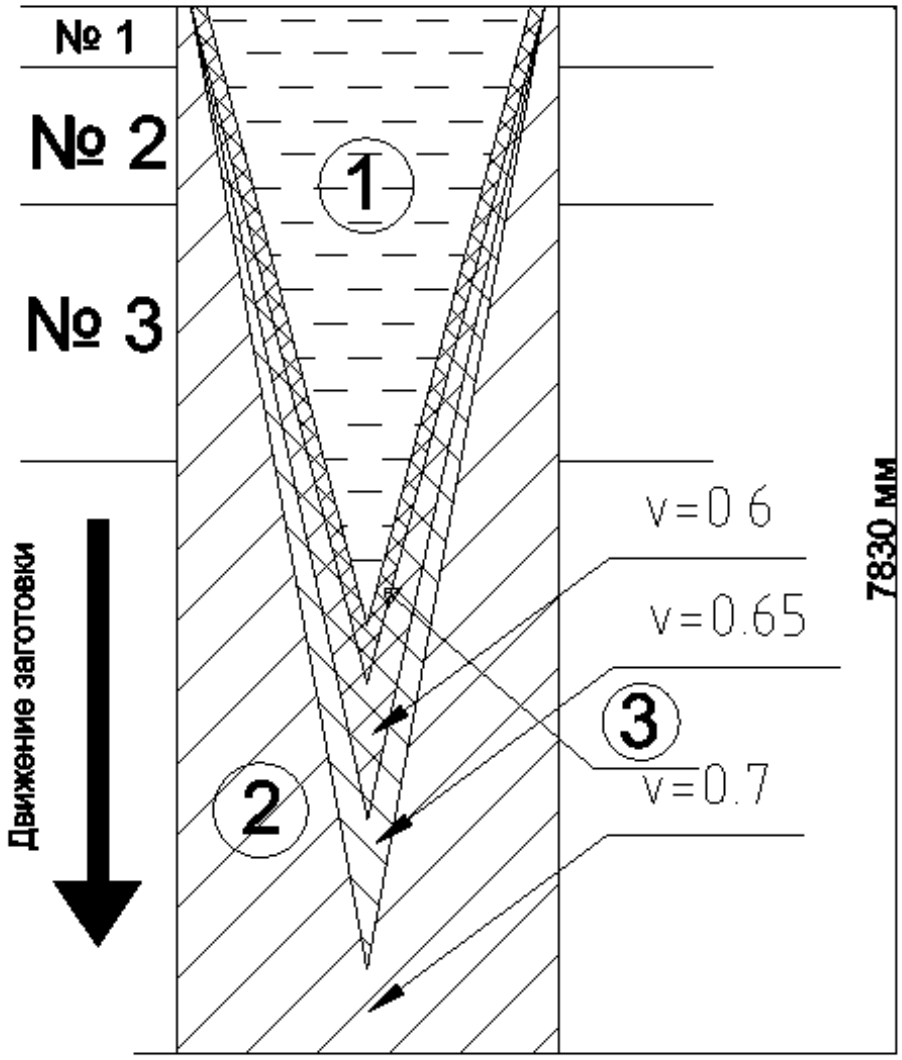


Рис. 2 –Изменение температуры поверхности заготовки при разных скоростях разливки

Как видно из рисунка 2, при υ = 0,65 м /мин изменение температуры поверхности заготовки происходит более равномерно, чем при υ = 0,7 м /мин и при этом не наблюдается значительного снижения температуры поверхности металла при выходе на воздух, как в случае разливки со скоростью 0,6 м/мин.

Также из рисунка 2 видно, что при υ=0,65 м/мин изменение температуры поверхности заготовки происходит более равномерно, чем при υ=0,7 м/мин, и при этом не наблюдается значительного снижения температуры поверхности металла при выходе на воздух, как при скорости разливки υ=0,6 м/мин. Кроме того, из рисунков 3 и 4 видно, что при скорости υ=0,6 м/мин происходит наиболее быстрое затвердевание по сечению заготовки и наблюдается менее протяжённая жидкометаллическая лунка, но при этом происходит сильное охлаждение поверхности заготовки на воздухе (до 800 °С). Также при скорости разливки 0,6 м/мин на выходе из кристаллизатора температура поверхности заготовки меньше 1100 °С, что не соответствует технологическим требованиям. Из написанного выше следует, что наиболее рациональным режимом охлаждения в ЗВО можно считать режим при скорости разливки υ = 0,65 м/мин. Данный режим также имеет некоторые недостатки. На выходе из кристаллизатора происходит резкое снижение температуры поверхности заготовки в силу интенсивного теплоотвода в первой зоне вторичного охлаждения, и это может привести к образованию внутренних и наружных трещин в заготовке на ранних стадиях её формирования.



υ=0,7 м/мин, 0,65 м/мин и 0,6 м/мин; № 1 – первая секция ЗВО, № 2 – вторая секция ЗВО, № 3 – третья секция ЗВО

Рис. 3 – Сравнительное положение жидкометаллической лунки при разных скоростях разливки

С целью поиска наиболее рациональных параметров процесса непрерывной разливки и предотвращения вышеперечисленных недостатков исследованных режимов были проведены исследования режимов охлаждения при скорости разливки υ=0,65 м/мин и разной интенсивности теплоотвода. В первую очередь исследовались тепловое состояние непрерывнолитых заготовок в первой секции вторичного охлаждения, так как толщина затвердевшего металла в ней наименьшая по сравнению с остальными секциями ЗВО и она является определяющей для всего процесса непрерывной разливки. Изучалось изменение температуры поверхности заготовки в зависимости от интен-

сивности теплоотвода. Результаты исследований тепловых режимов в первой секции ЗВО при разных коэффициентах теплоотдачи представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнительная таблица температуры при разных коэффициентах теплоотдачи в первой зоне вторичного охлаждения

Длина, м	Время, мин	Температура поверхности заготовки при разных коэффициентах теплоотдачи α в первой зоне вторичного охлаждения, К		
		α=500 Вт/(м^2·К)	α =450 Вт/(м^2·К)	α =400 Вт/(м^2·К)
0	1,24	1103	1103	1103
0,25	1,62	975	994	1013
0,36	1,79	947	968	997
Перепад температуры по поверхности заготовки		150	129	106

В дальнейших исследованиях теплового состояния непрерывнолитых заготовок и поиске рационального режима охлаждения стремились также избежать возможных термических напряжений, возникающих при значительных перепадах температуры, особенно на участках перехода между зонами вторичного охлаждения, а также затягивания процесса затвердевания, связанного с уменьшением интенсивности теплоотвода от поверхности заготовки. Результаты исследований режимов представлены в таблицах 4 и 5. Все данные были получены благодаря расчётам по разработанной математической модели процесса охлаждения при непрерывной разливке стали.

Таблица 4 – Исследованные режимы охлаждения круглых заготовок в процессе непрерывной разливки стали

Наименование режима	Конвективный коэффициент теплоотдачи по зонам вторичного охлаждения, Вт/(м^2·К)		
	ЗВО I	ЗВО II	ЗВО III
Режим 1	400	300	225
Режим 2	400	300	180
Режим 3	450	320	220
Режим 4	450	320	200
Режим 5	500	380	200
Режим 6	500	300	225
Режим 7	500	320	225
Режим 8	500	380	225

Режим 9	500	350	225

Таблица 5– Сравнение параметров непрерывной разливки при скорости разливки υ=0,65 м/мин и разной интенсивности теплоотвода в различных зонах вторичного охлаждения

Коэффициенты теплоотдачи в разных ЗВО, α, Вт/(м^2·К)			Температура поверхности металла на входе в зону воздушного охлаждения, °С	Максимальная температура поверхности металла на воздухе, °С	Длина жидкометаллической лунки в конце первого этапа разливки, м	Время вытягивания заготовки до момента затвердевания, мин
I	II	III				
500	380	200	828	907	6,5	12,48
500	300	225	820	909	6,62	12,66
500	380	225	806	899	6.43	12,37
500	350	225	810	903	6,5	12,48
450	320	200	841	918	6,68	12,76
450	320	220	823	903	6,62	12,68
400	300	225	824	913	6,7	12,79

На рисунке 4 показано изменение температуры поверхности заготовки при различных значениях коэффициента теплоотдачи в разных зонах вторичного охлаждения при скорости разливки υ=0,65 м/мин.

Согласно рисунку 4 и таблицам 4, 5 видно, что при реализации режимов с коэффициентом теплоотдачи 500 Вт/(м^2·К) в первой секции зоны вторичного охлаждения происходит значительное падение температуры по длине заготовки. Учитывая сравнительно малую толщину затвердевшего металла на данном участке (до 30 мм), такой резкий перепад температуры может привести к образованию трещин в затвердевшей заготовке из-за превышения допустимых термических напряжений. Поэтому, несмотря на то, что в данном режиме протяжённость жидкометаллической лунки и общее время затвердевания заготовки будет немного меньше, чем при режимах с менее интенсивным теплоотводом в первой ЗВО, наиболее рациональным стоит считать режим, характеризуемый коэффициентом теплоотдачи 400 Вт/(м^2·К) в первой секции ЗВО, так как при данном режиме значительно сокращается перепад температуры по длине в данной секции. Кроме того, с целью уменьшения величины термических напряжений в затвердевающем металле интенсивность теплоот-

дачи во второй и третьей секциях ЗВО должна соответствовать коэффициентам теплоотдачи α=300 Вт/(м^2·К) и α=225 Вт/(м^2·К). Такая интенсивность теплоотвода позволит избежать разогрева на поверхности заготовки при переходе между секциями зон вторичного охлаждения, не затягивая процесс во времени в сравнении с другими режимами. Также из графиков видно, что данный режим обеспечивает практически монотонное снижение температуры по длине заготовки без переохлаждений и значительных разогревов поверхности, в отличие от других сравниваемых режимов, например, режимов 8 и 9, что соответствует предъявляемым технологическим требованиям к организации процесса непрерывной разливки стали.

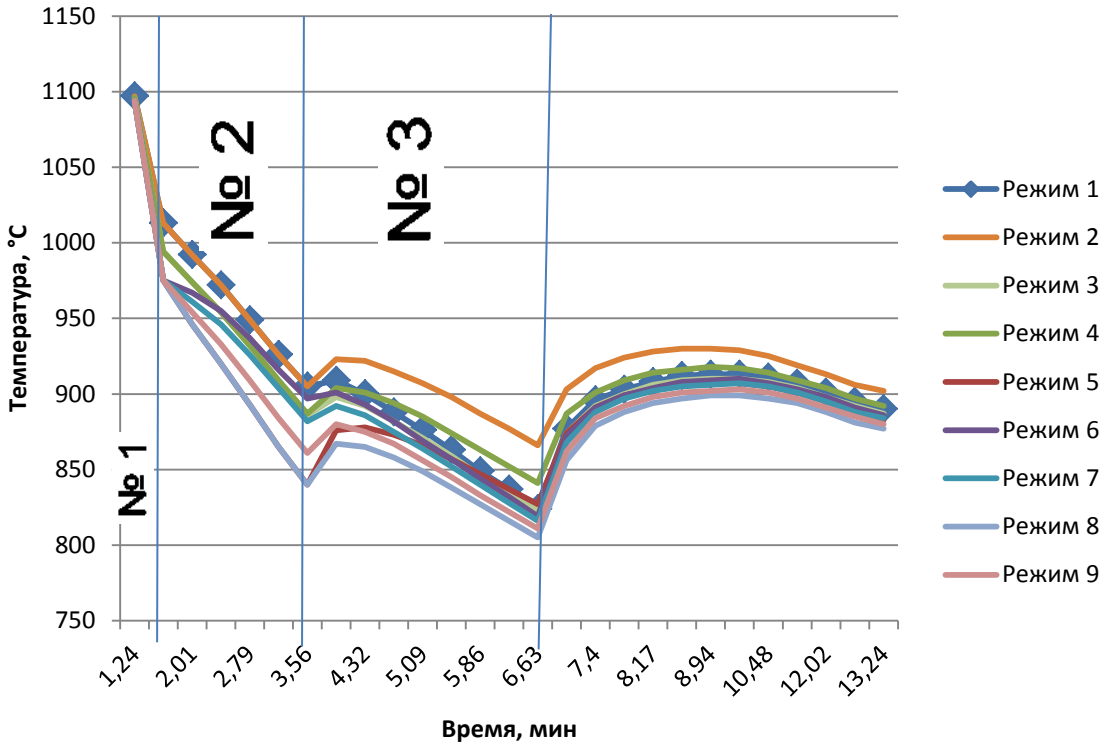
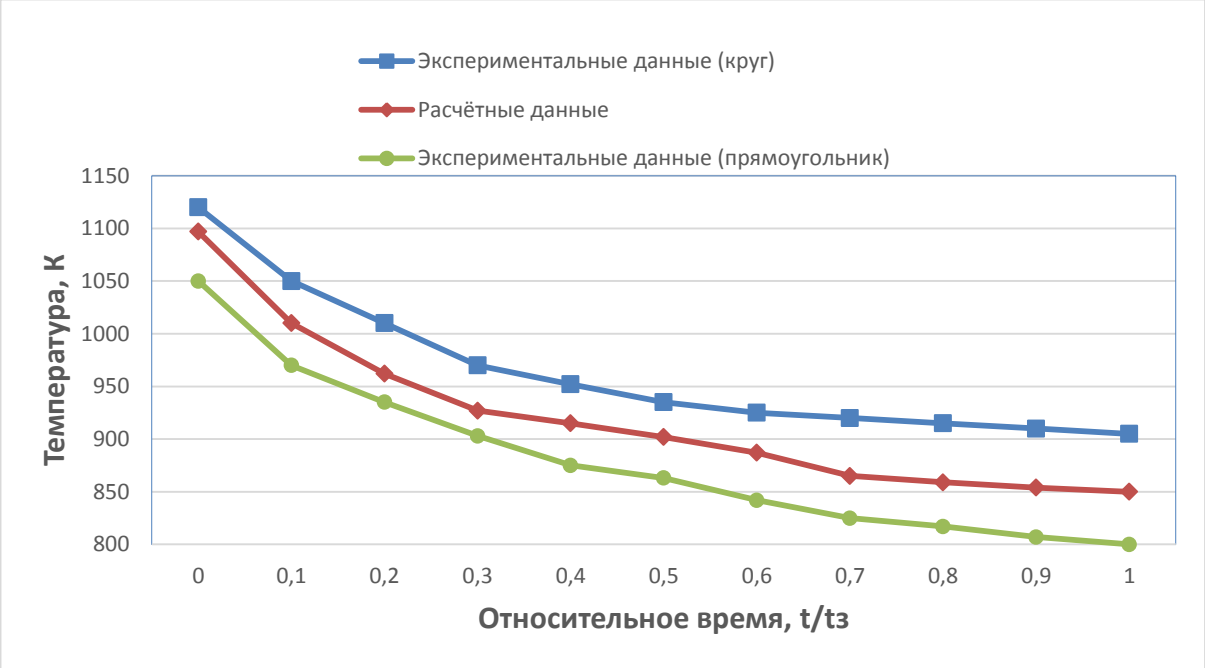


Рис. 4 – Изменение температуры по длине заготовки при скорости разливки υ=0,65 м/мин в зависимости от интенсивности теплоотвода

Разработанная модель обеспечивает высокую сходимость и точность исследований, что подтверждается сравнением полученных по модели данных с теми расчётными и опытными результатами, которые присутствуют в исследованиях ЦНИИчермет им. И.П. Бардина и некоторых современных авторов, таких как Урбанович Л.И., Скворцов А.А., Марченко А.Д., Лукин С.В., Генкин В.Я., Есаулов А.В., Мираслимов В.М. Для адаптации модели также использовались данные ВНИИМТ, полученные в экспериментах по измере-

нию температур поверхности непрерывнолитой заготовки при помощи вмороженных термопар на Ново-Липецком металлургическом комбинате.

Сравнение расчётных и экспериментальных данных проводится с учётом термической массивности тела, которая определяется значением числа Био (Bi). При определении температурных полей на поверхности заготовки использовались данные для заготовок круглого сечения диаметром 360 миллиметров при схожих значениях числа Био. Графически результаты сравнения представлены на рисунке 5.



t – текущее время, с; tз – полное время затвердевания заготовки, с;t/tз – относительное безразмерное время

Рис. 5 – Сравнение расчётных данных по модели с экспериментальными данными для круглой заготовки диаметром 360 мм

Из рисунка 5 видно, что в процессе затвердевания наблюдается расхождение между расчётными и экспериментальными данными, которое в своём максимуме не превышает 55 К, а среднее расхождение составляет не более 45 К, что соответствует погрешности около 5 %. Это позволяет судить о достаточной для инженерных расчётов точности разработанной модели и позволяет говорить о допустимости использования разработанной математической модели для определения основных технологических параметров при непрерывной разливке круглых заготовок.

Глава 4. Влияние неоднородности граничных условий тепловых режимов охлаждения на возникающие термические напряжения при непрерывной разливке стали

В четвёртой главе представлены результаты исследования влияния температурных полей на возникающие термические напряжения в заготовке в случаях симметричного и асимметричного режимов охлаждения.

Процесс затвердевания заготовки невозможно рассматривать без учёта влияния неоднородности граничных условий тепловых режимов охлаждения на вероятность появления внутренних и наружных дефектов получаемого литого металла. Помимо скорости разливки и интенсивности охлаждения, необходимо учитывать термические напряжения, возникающие в охлаждаемой заготовке.

Градиенты температуры в каждом сечении по длине заготовки определялись по формуле:

$$\mathrm{grad}T = (T_{\text{внутр}} - T_{\text{пов}})/L, \quad (10)$$

где $T_{\text{внутр}}$ – температура металла на границе раздела жидкой и твёрдой фазы в двухфазной области, °С;

$T_{\text{пов}}$ – температура на поверхности заготовки, °С;

L – толщина корочки затвердевшего металла, мм.

Термические напряжения, возникающие в затвердевающей цилиндрической заготовке, определялись по формулам:

$$\sigma=(\beta\cdot E/2)\cdot(1-\nu)\cdot (T_{\text{внутр}}-T_{\text{пов}})\cdot 10^{-6}, \text{ МПа}, \quad (11)$$

$$\sigma = \frac{\beta\cdot E}{1-\mu}\cdot\frac{q\cdot S}{2\lambda}\cdot\left(\frac{1}{2}-\left(\frac{r}{R}\right)^2\right), \text{ МПа}, \quad (12)$$

где β – коэффициент линейного удлинения стали, °С$^{-1}$;

E – модуль упругости, Па;

μ – отношение Пуассона (для стали равно 0,3);

q– плотность теплового потока на поверхности заготовки, Вт/м^2;

S – характерный размер заготовки, м;

λ(T) - коэффициент теплопроводности стали, Вт/(м·К);

R – внешний радиус заготовки, м;

r – радиус не затвердевшей области металла, м;

t – время, с.

Компоненты термических напряжений определялись по следующим зависимостям:

$$\sigma_z = \frac{\beta \cdot E}{1-\mu} \cdot \left(\frac{2}{R^2} \int_0^R trdr - t \right),$$
$$\sigma_t = \frac{\beta \cdot E}{1-\mu} \cdot \left(\frac{1}{R^2} \int_0^R trdr + \frac{1}{r^2} \int_0^r trdr - t \right), \quad (13)$$
$$\sigma_r = \frac{\beta \cdot E}{1-\mu} \left(\frac{1}{R^2} \int_0^R trdr - \frac{1}{r^2} \int_0^r trdr \right),$$

где σ_z, σ_t и σ_r – соответственно осевые, тангенциальные и радиальные напряжения, МПа.

Все исследования проводились с целью нахождения тех условия охлаждения, при которых возникающие в заготовке максимальные термические напряжения σ_{max} будут меньше допустимых термических напряжений $\sigma_{доп}$ для коррозионностойких марок сталей.

Необходимо отметить, что при прогнозировании разрушения стали от температурных напряжений используют временное сопротивление $\sigma_в$ в качестве $\sigma_{доп}$. Согласно данным из литературы, $\sigma_{доп}$ принимают равным $0{,}9\sigma_в$. Для коррозионностойких марок сталей $\sigma_в$ примерно равно 1010 МПа. Следовательно, $\sigma_{доп}=0{,}9 \cdot 1010$ МПа = 909 МПа.

Термические напряжения определялись для двух случаев:

1) по длине заготовки в каждом сечении без учёта перетоков теплоты, которые возникают между зонами охлаждения с различной интенсивностью теплоотвода;

2) по длине заготовки в каждом сечении с учётом возникающих перетоков теплоты между секциями с различной интенсивностью охлаждения по периметру заготовки.

В первом случае полагали, что по периметру заготовки в каждой секции водовоздушного охлаждения интенсивность теплоотвода постоянна, а по длине она изменяется.

Во втором случае предполагалось, что несимметричность охлаждения заготовки наблюдается только по её окружности. В продольном направлении интенсивность охлаждения сохраняется постоянной в пределах секторов охлаждения по периметру. При расчёте учитывалось взаимное влияние зон охлаждения друг на друга. Длины окружности секторов охлаждения равны между собой и кратны количеству секторов. Рассматривались термические напряжения, возникающие между областями в соседних зонах охлаждения в каждом сечении.

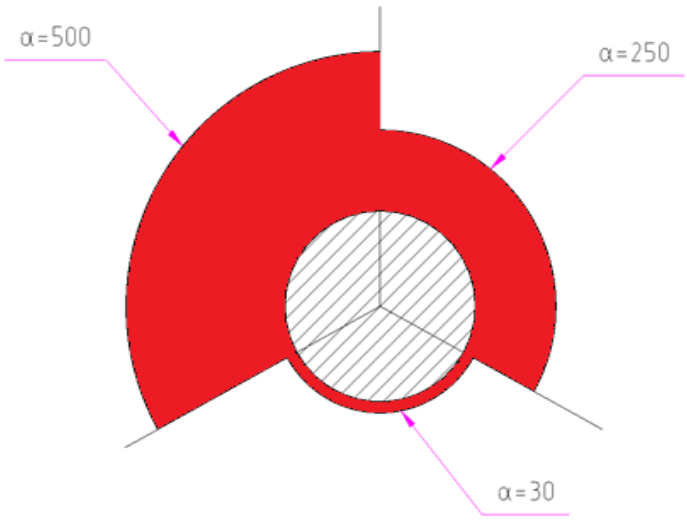


Рис. 6 – Пример распределения интенсивности охлаждения для трёх секторов по периметру заготовки

При исследовании влияния интенсивности теплоотвода от поверхности заготовки на величины термических напряжений, возникающих при ассиметричном охлаждении по периметру заготовки без учёта и с учётом перетоков теплоты, были получены результаты, которые представлены на рисунках 7 и 8.

На рисунке 7 приведены результаты расчётов термических напряжений между соседними секторами охлаждения заготовки в каждом сечении с шагом 0,25 м. В каждом из этих секторов интенсивность охлаждения характеризуется различными значениями коэффициентов теплоотдачи. Прямая линия соответствует допустимым термическим напряжениям, равным 909 МПа.

Из рисунков 7 и 8 видно, что величины термических напряжений постепенно растут до определённых значений, а затем начинают уменьшаться при различных режимах охлаждения. Но величины термических напряжений между соседними секторами достигают существенно меньших значений, чем в рамках одного сектора охлаждения (без учёта перетоков тепловой энергии). Обусловлено это тем, что разность температуры между соседними участками зон охлаждения меньше, чем между поверхностью и центром. Максимальные термические напряжения возникают между участками с наибольшим и наименьшим теплоотводом от поверхности, что объясняется наибольшей разностью температуры в этих областях. Видно, что в этом случае величины термических напряжений становятся больше $\sigma_{доп}$, и это существенно увеличивает риск появления наружных и внутренних дефектов.

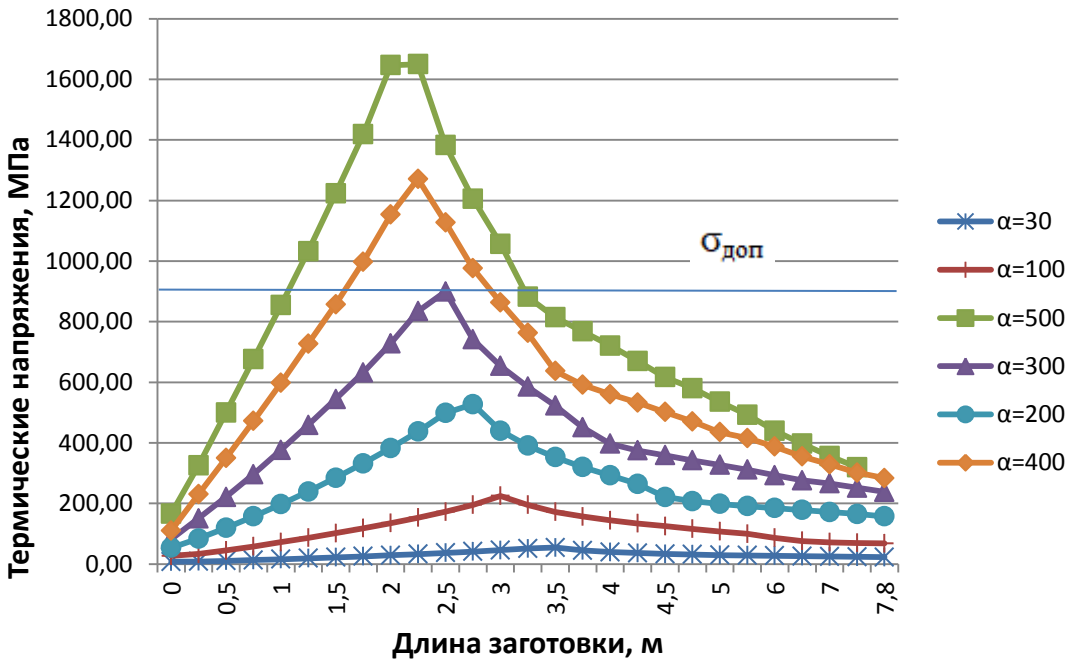


Рис. 7 – Изменение термических напряжений при различной интенсивности теплоотвода без учёта перетоков теплоты между секторами охлаждения

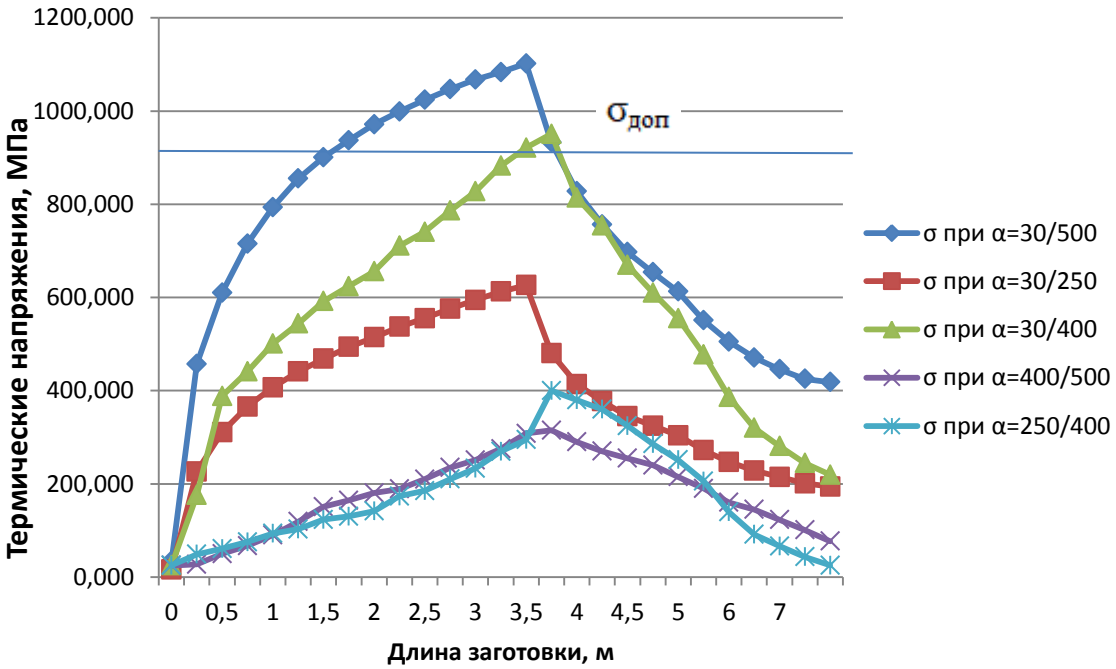


Рис. 8 – Изменение термических напряжений при различной интенсивности охлаждения заготовок с учётом перетоков теплоты между секторами охлаждения

Результаты расчёта на рисунке 8 показывают, что величины термических напряжений между секторами охлаждения будут тем меньше, чем меньше разница между интенсивностями теплоотвода в сравниваемых секторах охлаждения. Кроме того видно, что термические напряжения между секторами с интенсивностью охлаждения, характеризуемыми коэффициентами теплоотдачи 30 и 400 Вт/(м^2·К), меньше, чем при коэффициентах теплоотдачи 30 и 500 Вт/(м^2·К). Важно отметить, что значения термических напряжений между зонами с интенсивностью охлаждения при коэффициентах теплоотдачи 30 и 400 Вт/(м^2·К) превышают допустимые значения на небольшом участке заготовки в третьем секторе зоны вторичного охлаждении, – это позволяет говорить о допустимости применения режимов с данной интенсивностью охлаждения в течение непродолжительного времени в начале процесса затвердевания непрерывнолитой заготовки.

Глава 5. Обеспечение рациональных режимов ЗВО для формирования высококачественных заготовок

В пятой главе приводятся подробные рекомендации по организации рациональных тепловых режимов при непрерывной разливке заготовок из коррозионностойких марок сталей. Приводятся расчеты необходимого количества охлаждающей водовоздушной смеси и требуемой плотности орошения для обеспечения выбранного рационального режима охлаждения. Все рекомендации приводятся с учётом проведённых исследований и обосновываются в тексте работы. Общий расход воды на секцию рассчитывается по формуле:

$$J=g\cdot F/\mathrm{K}_{\text{и}}, \qquad (14)$$

гдеg – плотность орошения на данном участке, м^3/(м^2·ч);

F – площадь орошаемой поверхности, м^2;

$K_{\text{и}}$ – коэффициент использования воды.

В расчётах принимается, что вся вода из форсунок попадает на поверхность заготовки, то есть $K_{\text{и}}$=1.

Плотность орошения определяется по формуле:

$$g=(\alpha-\alpha_0)/B, \qquad (15)$$

где α – средний коэффициент теплоотдачи по зоне вторичного охлаждения, Вт/(м^2·К);

α_0 – номинальный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2·К),

B – опытный коэффициент, который для вертикальных установок непрерывной разливки изменяется в пределах от 34 до 40 (Вт·ч)/(м^3·К).

Площадь орошаемой поверхности для цилиндрической заготовки определяется по формуле:

$$F=\pi \cdot d \cdot L \quad , \qquad (16)$$

где d – диаметр заготовки, м;

L – длина орошаемой поверхности, м.

Рисунок 9 позволяет определить то количество воды, которое необходимо подать на поверхность заготовки высотой 1 метр для обеспечения необходимого коэффициента теплоотдачи. На практике это позволяет обеспечивать необходимые коэффициенты теплоотдачи по длине заготовки, которые не приведут к превышению допустимых термических напряжений, и разрабатывать новые рациональные режимы охлаждения для различных марок сталей. Графики построены для заготовок различного диаметра.

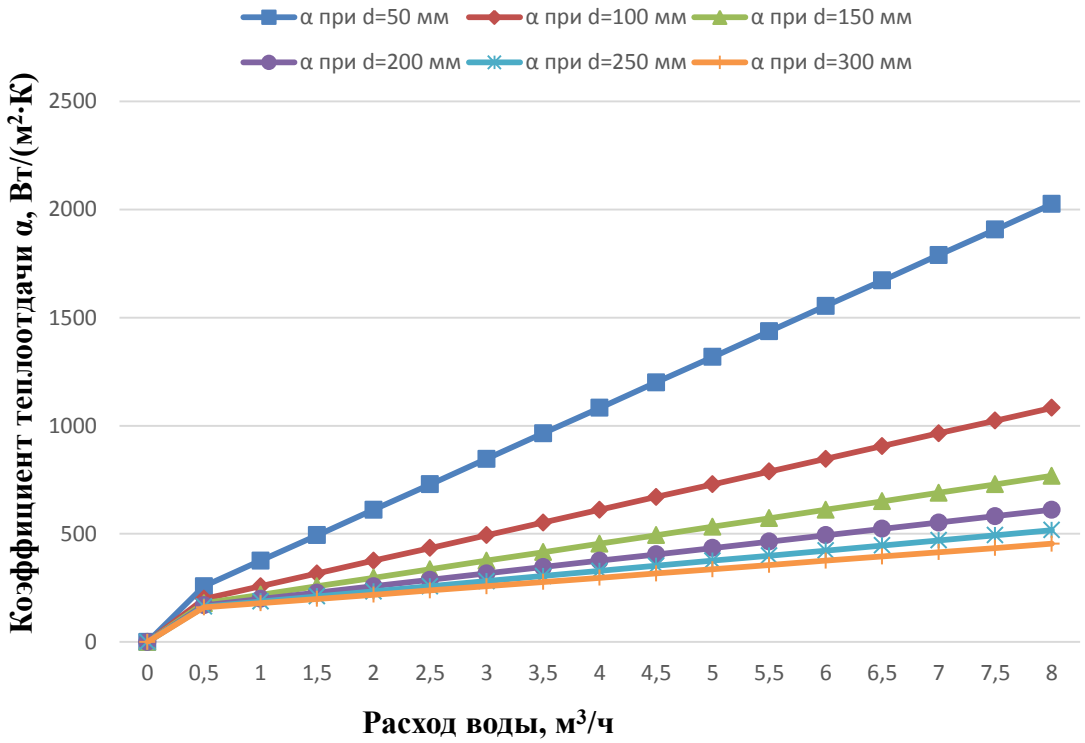


Рис. 9 – Зависимость коэффициента теплоотдачи от расхода подаваемой на поверхность металла воды при различных диаметрах заготовки

Заключение

1. В результате анализа современных тенденций и теплотехнических проблем в развитии технологии непрерывной разливки заготовок круглого

сечения из различных специальных (жаропрочных, инструментальных, конструкционных, коррозионностойких) марок сталей, сделаны выводы о необходимости дальнейшего совершенствования и развития технологии.

2. Разработана математическая модель процесса охлаждения при непрерывной разливке стали, учитывающая влияние неоднородности граничных условий на формирование температурных полей и возникающих термических напряжений в затвердевающей заготовке.

3. Изучены современные режимы охлаждения заготовок круглого сечения при непрерывной разливке. Разработан рациональный режим охлаждения заготовок из коррозионностойких марок сталей в зоне вторичного охлаждения, который обеспечит их затвердевание без превышения допустимых термических напряжений.

4. Рациональный режим охлаждения характеризуется скоростью разливки в кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения, равной 0,65 м/мин, и коэффициентами теплоотдачи, равными 400, 300 и 225 Вт/(м^2·К) в первой, второй и третьей секциях зоны вторичного охлаждения соответственно, и позволяет сократить количество дефектов в заготовках из коррозионностойких марок сталей, получаемых методом непрерывной разливки.

5. Разработана математическая модель для расчёта температурных полей и термических напряжений, возникающих в процессе охлаждения заготовок при непрерывной разливке, учитывающая перетоки теплоты как в радиальном, так и в осевом направлениях. Показано, как осевые и радиальные перетоки теплоты изменяют температурные поля в заготовке и влияют на возникающие в процессе охлаждения термические напряжения.

6. Проведен анализ возникающих термических напряжений при различных режимах охлаждения непрерывнолитой заготовки как для случаев симметричного, так и для асимметричного распределения интенсивности теплоотвода от поверхности заготовки. Результаты расчетов позволили выявить рациональный режим охлаждения, при которых возникающие термические напряжения не превышают допустимых значений.

7. Приведена инженерная методика и результаты расчета системы водовоздушного охлаждения заготовки, обеспечивающей предложенный рациональный режим и позволяющей получать непрерывнолитые заготовки без внутренних и наружных дефектов.

Основные положения диссертации опубликованы в работах

1. Краюшкин Н.А., Кузнецова Н.П. Исследование тепловых режимов затвердевания круглых заготовок из высококачественных марок сталей

при полунепрерывной разливке стали // Изв. Вуз. Чёрная металлургия. - 2012. - № 7. - С. 45-48.
2. Кузнецова Н.П., Краюшкин Н.А. Исследование тепловых режимов затвердевания при полунепрерывной разливке круглых стальных слитков для производства бесшовных труб // Изв. Вуз. Чёрная металлургия.- 2014. - № 3. - С. 34-38.
3. Краюшкин Н.А., Прибытков И.А., Шатохин К.С. Исследование влияния неоднородности граничных условий на интенсивность охлаждения цилиндрических заготовок в МНЛЗ // Изв. Вуз. Чёрная металлургия. - 2016. - № 9. - С. 651-655.
4. Кузнецова Н.П., Краюшкин Н.А. Сравнительный анализ процесса полунепрерывной разливки стали в России и Европе // 66-ые Дни науки МИСиС. - 2011. - С. 47.
5. Краюшкин Н.А., Кузнецова Н.П., Шатохин К.С. Анализ тепловых режимов затвердевания при полунепрерывной разливке круглых стальных слитков для производства бесшовных труб /XII Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Энергосбережение. Экология. Новые технологии». - СТИ «МИСиС». - 2015. - С. 335-341.
6. Краюшкин Н.А., Прибытков И.А., Шатохин К.С. Исследование влияния неоднородности граничных условий на интенсивность охлаждения цилиндрических заготовок в МНЛЗ при осесимметричном и осенесимметричном охлаждении / VIII международная научно-практическая конференция «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии в промышленности. 100 лет отечественного проектирования металлургических печей». - НИТУ «МИСиС». - 2016. - С. 79-85.