

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

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»

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
к.т.н., доцент Шатохин К.С.

Москва – 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	9
1.1 Особенности кристаллизации стали при непрерывной разливке заготовок круглого сечения.	9
1.2 Основные дефекты непрерывнолитых заготовок круглого сечения.	14
1.3 Влияние технологических и теплотехнических факторов на качество непрерывнолитых заготовок.	20
1.4 Теплофизические основы процессов охлаждения и затвердевания стали при непрерывной разливке.	25
1.5 Тенденции развития технологии непрерывной разливки стали	31
1.6 Принцип работы и теплообмен в кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения.	34
1.6.1 Принцип работы и теплообмен в кристаллизаторе.	34
1.6.2 Принцип работы и теплообмен в зоне вторичного охлаждения. . . .	38
1.7 Теория двухфазной зоны кристаллизационного расплава и ее приложение к затвердеванию непрерывнолитой заготовки.	48
1.8 Влияние химического состава стали на процесс затвердевания и свойства получаемого металла.	51
1.9 Выводы.	54
ГЛАВА 2. ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ОХЛАЖДАЕМЫХ ЗАГОТОВОК КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ В УСТАНОВКАХ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ.	56
2.1 Описание машины непрерывного литья заготовок и технологии процесса разливки.	56
2.2 Постановка задачи.	59
2.3 Цели и задачи исследования.	60

2.4 Разработка математической модели процесса охлаждения при непрерывной разливке заготовок круглого сечения. . . .	61
2.5 Исходные данные для исследования тепловых состояний непрерывнолитых заготовок.	72
2.6 Выводы.	75
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).	
3.1. Исследование теплового состояния затвердевающей заготовки в кристаллизаторе, расчет скорости затвердевания и температурных полей затвердевшей корочки металла в различных условиях работы кристаллизатора.	76
3.2 Исследование теплового состояния заготовок в зоне вторичного охлаждения в процессе непрерывной разливки стали	89
3.2.1 Анализ рабочего теплового режима зоны вторичного охлаждения в процессах непрерывной разливки заготовок круглого сечения из высококачественных марок сталей.	89
3.2.2 Расчет скорости затвердевания и распределения температуры в затвердевающей заготовке при различных условиях работы ЗВО.	94
3.3 Апробация математической модели и проверка расчётных данных на соответствие с практическими данными	107
3.4 Выводы.	111
ГЛАВА 4. ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ОХЛАЖДЕНИЯ НА ВОЗНИКАЮЩИЕ ТЕРМИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКЕ СТАЛИ.	
	113

4.1 Термические напряжения, возникающие при однородных и неоднородных граничных условиях по длине заготовки без учета перетоков теплоты.	113
4.2 Термические напряжения, возникающие при неоднородных граничных условиях по периметру заготовки без учета перетоков теплоты.	125
4.3 Исследование влияния неоднородности граничных условий по периметру заготовки на термические напряжения с учётом перетоков теплоты.	130
4.4 Выводы.	136
ГЛАВА 5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЗВО ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ ЗАГОТОВОК.	137
5.1 Анализ современных распыливающих устройств, применяемых в металлургии.	137
5.2 Расчет требуемых расходов и плотностей орошения с целью обеспечения рационального режима ЗВО с использованием форсуночных устройств.	139
5.3 Выводы.	147
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.	148
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	150
Приложение А. Схема и характеристики круглофакельных форсунок фирмы Lechler	160
Приложение Б. Схема и характеристики круглофакельных форсунок фирмы Lechler с расходом воды $0,42 \text{ м}^3/\text{ч}$	161

ВВЕДЕНИЕ

Технология непрерывной разливки стали интенсивно разрабатывалась в течение последних десятилетий в нашей стране и за рубежом и является важной отраслью современной металлургической промышленности.

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 повышении качества получаемых цилиндрических непрерывнолитых заготовок обусловлена требованиями современной металлургической промышленности и является важным вопросом отрасли, так как улучшение качества даже 0,1 % заготовок, получаемых непрерывным литьём, позволит увеличить качество около 50 000 тыс. тонн стали в год, получаемой методом непрерывной разливки. В связи с этим весьма актуальной является задача совершенствования оборудования МНЛЗ и технологии разливки, обеспечивающих высокое качество получаемых заготовок, при одновременном обеспечении высокой производительности агрегатов. В нашей стране ведутся широкие экспериментальные и теоретические исследования по совершенствованию тепловой работы МНЛЗ, которые способствуют решению практических задач увеличения производительности и выхода годного металла без увеличения количества производимых заготовок.

Перед современными металлургами стоит задача постоянного улучшения качества и снижения себестоимости готовых металлоизделий. Необходимо отметить, что принципиально вопросы, связанные с обеспечением требуемого состава и чистоты стали, решены и перешли в разряд технических. Вместе с тем, вопросам кристаллизации - важнейшему этапу, на котором происходит формирование свойств готовых металлоизделий, уделяется недостаточное внимание. Одной из главных целей, которые ставились перед этой работой, был

поиск эффективных технологических решений, позволяющих уменьшить количество дефектов и повысить качество непрерывнолитых заготовок без дополнительных капиталовложений с учетом влияния тепловых режимов на возникающие термические напряжения в заготовке.

Актуальной задачей является совершенствование процессов охлаждения заготовки в зоне вторичного охлаждения (ЗВО), направленных на интенсификацию затвердевания и уменьшение дефектов, возникающих в процессе непрерывной разливки. ЗВО должна выполнять две основных 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 ЗВО 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.

В диссертационной работе на основе математического моделирования процесса охлаждения проводится поиск рациональных режимов охлаждения заготовок круглого поперечного сечения из высококачественных и специальных марок сталей и выявляются теплотехнические требования к совершенствованию их непрерывной разливки с целью разработки рациональных режимов охлаждения, позволяющих избежать возникновения наружных и внутренних дефектов непрерывнолитой заготовки. Особое

внимание уделяется правильной организации тепловых режимов в зоне вторичного охлаждения.

В ходе исследований были получены данные, представляющие научную новизну.

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.

2. Разработанная математическая модель процесса охлаждения при непрерывной разливке стали отличается способом поэлементного присвоения численных значений теплофизическим параметрам при учете скрытой теплоты кристаллизации в развитой двухфазной зоне.

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

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

Многие данные, полученные в ходе исследований, имеют определённую практическую значимость для современной металлургической промышленности.

1. Обоснована рациональная скорость разливки и рациональный режим охлаждения заготовок из коррозионностойких марок сталей в зоне вторичного охлаждения с коэффициентами теплоотдачи $\alpha=400, 300$ и $225 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ 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.

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 и плотности орошения водовоздушной смеси для реализации рационального режима охлаждения.

Тепловые режимы играют крайне важную роль для получения высококачественных 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 и обеспечить получение заготовок без наружных и внутренних дефектов.

ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 Особенности кристаллизации стали при непрерывной разливке заготовок круглого сечения

При обычной разливке стали в изложницы плотность центральной части заготовки зависит от его конусности, отношения высоты к среднему диаметру, размера и формы прибыльной надставки, вида теплоизолирующих покрытий и физико-химических свойств стали. Выбор технологических параметров при обычной разливке основан на принципе поддержания достаточно низкой вязкости жидкого металла и более широкого конуса незакристаллизовавшегося в средней части заготовки металла, т.е. необходимо поддержание в жидком состоянии металла верхней части заготовки. Принцип непрерывного литья, основанный на непрерывной подаче металла в кристаллизатор и на непрерывном вытягивании формирующейся заготовки, исключает возможность создания специальной прибыльной части для получения плотной макроструктуры.

Как отмечено специалистами отдела непрерывной разливки стали ЦНИИчермет им. И.П. Бардина [1, 2, 3], отличительными особенностями формирования непрерывнолитой заготовки, которые определяют ее строение, являются большие скорости кристаллизации и малая продолжительность ее полного затвердевания, поэтому ликвация в непрерывнолитой заготовке значительно меньше, чем в обычной. Однако при высоких скоростях вытягивания глубина жидкой фазы, в которой образуется осевая зона, достигает значительных величин. Осевая зона литых заготовок является тепловым центром, затвердевающим в последнюю очередь. Этот тепловой центр постоянно присутствует в заготовке и не может быть удален или выведен. При затвердевании непрерывнолитой заготовки в условиях глубокого сильно вытянутого расположения лунки кристаллизующегося металла и наличия усадки заготовки в связи с переходом из жидкого в твердое состояние

образуются и развиваются значительные конвективные потоки. Эти потоки усиливают осевую ликвацию в непрерывнолитой заготовки. Следовательно, наличие вытянутой острой лунки и значительных конвективных потоков обуславливают образование в осевой зоне пористости и ликвационных пятен. В процессе избирательной кристаллизации маточный раствор, обогащенный примесями, оттесняется в осевую зону заготовки. Участок осевой пористости, отсеченный от верхних питающих жидких слоев, представляет собой своеобразную полость по отношению к окружающим участкам. В эту полость стремятся ликваты, имеющие пониженную температуру плавления и находящиеся в жидком состоянии. При этом нередко вокруг ликвационного пятна образуется область металла, обедненного легирующими примесями, так называемая область обратной ликвации. По-видимому, осевая пористость обуславливает концентрацию ликватов, образовавшихся в результате избирательной кристаллизации [1, 2, 3].

В результате исследований [4] было установлено, что в непрерывнолитой заготовке в зависимости от протяженности зоны двухфазного состояния образуется двух- или трехзонная структура. При ограниченной протяженности области двухфазного состояния, что, как правило, наблюдается у заготовок малых сечений, образуется двухзонная структура (зона мелких кристаллов и зона столбчатой кристаллизации, простирающаяся до центра литой заготовки). Поскольку фронт затвердевания представляет собой поверхность с резко выраженными выступами и впадинами, то при смыкании выступов от противоположных фронтов затвердевания образуются «мосты», между которыми находится жидкий металл. В результате затвердевания этих изолированных объемов металла образуются усадочные пустоты - концентрированная осевая пористость и осевая ликвация.

При развитой зоне двухфазного состояния, что характерно для заготовок больших сечений, образуется трехзонная структура: периферийная зона мелких кристаллов, зона столбчатой кристаллизации, имеющая ограниченное развитие, и различно ориентированные кристаллы в осевой зоне. Очевидно, в таких

заготовках затвердевание происходит по-иному. Одновременно с оттеснением загрязненной ликватами жидкой фазы к центру зона жидко-твердого состояния получает заметное развитие, температура в ней понижается. На определенном этапе, обусловленном снижением теплоотвода в результате увеличения теплового сопротивления оболочки заготовки, наличия обломков дендритов и неметаллических включений перед фронтом затвердевания, рост столбчатых кристаллов практически прекращается. Дальнейшее понижение температуры металла в двухфазной зоне создает возможность перехода зоны жидко-твердого состояния в зону твердожидкого состояния с преобладанием твердой фазы в виде дендритов, их обломков, неметаллических включений, которые могут играть роль центров кристаллизации. В результате происходит отсечение отдельных объемов жидкой фазы с образованием рассредоточенной осевой пористости, частично заполненной раствором, обогащенным легирующими примесями.

В работе [5] автор приводит схему процесса затвердевания непрерывнолитой заготовки. На первой стадии затвердевания происходит сравнительно равномерное продвижение фронта затвердевания столбчатых кристаллов. На второй стадии равномерное продвижение фронта нарушается. Часть столбчатых кристаллов растет быстрее, и появляются предпосылки образования мостов в средней незатвердевшей части заготовки. На третьей стадии происходит образование мостов в результате смыкания фронтов затвердевания. Эти мосты образуются при встрече столбчатых кристаллов и вследствие опускания крупных кристаллов, которые «запутываются» между фронтами затвердевания. На четвертой стадии мосты утолщаются и упрочняются. Под мостами сохраняются остатки жидкого металла, который затвердевает аналогично металлу в обычной изложнице, но со скоростью значительно меньшей.

В головной части этого объема металла после затвердевания наблюдаются грубые равноосные кристаллы, обогащенные легирующими элементами. Здесь происходит образование пустот, так как усадка объема не

компенсируется его подпиткой жидким металлом. В нижней части объема находятся более мелкие кристаллы с пониженным содержанием легирующих элементов, и наблюдается повышенное содержание неметаллических включений. Исследования макроструктуры литых заготовок, проведенные на травленых темплетах и по серным отпечаткам, показали, что имеется определенная периодическая закономерность подлине заготовки в расположении участков относительно плотного металла и участков осевой пористости, сопровождаемой ликвацией. Эта закономерность вызвана дискретным характером затвердевания непрерывнолитых заготовок. Смыкание дендритов и прекращение питания жидким металлом нижних горизонтов создает в этих отсеченных объемах своеобразные условия, способствующие развитию некомпенсированной усадки и осевой ликвации. Движение жидкости в процессе затвердевания приводит к резкому перераспределению примесей (диффузия атомов и фильтрационный массоперенос многократно усиливаются вследствие конвекции), в результате чего возникает значительное обогащение примесями объемов металла, затвердевающих последними, и обеднение прилегающих к ним участков. С увеличением концентрации примесей обогащенная жидкость, несмотря на снижение температуры, становится подвижнее и при достижении определенных концентраций может свободно перемещаться среди разветвленных кристаллитов двухфазной зоны. Такая жидкость, обогащенная ликватами, проникает сквозь сомкнутые дендриты, заполняя пустоты, образовавшиеся в кристаллизующемся под мостом металле. В результате образуются ликвационные участки. По-видимому, если в заготовке основное развитие получит зона твердожидкого состояния с преобладанием твердой фазы, то в этом случае протекание фильтрационных и диффузионных процессов будет в значительной мере ослаблено вследствие недостатка времени, материала и пространства. В этом случае по всему объему образуется микронеоднородность в локальных объемах, которая впоследствии может быть практически полностью ликвидирована в результате нагрева перед деформацией и самой деформацией.

В связи с этим все мероприятия, имеющие целью улучшение макроструктуры непрерывнолитой заготовки, направлены на создание широкой зоны твердо-жидкого состояния с преобладанием твердой фазы, где протекание усадочных и ликвационных явлений ограничено.

Еще одной особенностью формирования непрерывнолитых заготовок (НЛЗ) является «поведение» зазора в кристаллизаторе при формировании начальной корочки заготовки. В процессе образования оболочки и нарастания ее толщины происходят ее усадка и образование газового зазора между поверхностью оболочки заготовки и стенками кристаллизатора. Термическое сопротивление увеличивается, а плотность теплового потока снижается, скорость затвердевания также падает. При этом происходит разогрев корочки, прочность ее уменьшается и под действием ферростатического давления она вновь прижимается к стенке кристаллизатора. Таким образом происходит многократная пульсация.

Показано, что в кристаллизаторе нет постоянного контакта заготовки с ее стенками [6]. Сформировавшаяся оболочка заготовки соприкасается со стенками кристаллизатора по всей поверхности в отдельных точках, между которыми имеется газовый зазор, образуемый между складками на поверхности заготовки, которыми она опирается на стенку кристаллизатора. По мере удаления от мениска металла уменьшается относительное время контакта оболочки непрерывнолитой заготовки со стенками кристаллизатора, что обусловлено усадкой заготовки, увеличением толщины корочки и ее жесткости. Однако даже на выходе из кристаллизатора контакт полностью не прерывается.

Толщина газового зазора нестабильна и может меняться по высоте и периметру кристаллизатора, поэтому правильно считать, что в верхней части кристаллизатора наиболее частое соприкосновение, а в нижней части корочка заготовки значительно чаще отходит от стенок кристаллизатора.

Из всего вышесказанного следует, что условия формирования непрерывнолитой заготовки вызывают появление тех или иных дефектов. Дефекты непрерывнолитых заготовок разделяются на внутренние и внешние.

1.2 Основные дефекты непрерывнолитых заготовок круглого сечения

Классификация поверхностных дефектов является одним из важнейших факторов совершенствования технологических процессов и улучшения показателей качества металлопроката. Необходимо классифицировать дефекты поверхности и макроструктуры заготовки и определить влияние технологических и конструктивных параметров на степень их развития. К поверхностным дефектам относятся следующие: трещины продольные, трещины поперечные, заливины, шлаковые включения, пузыри (поверхностные и подкорковые), заворот корки, ужимины, царапины, риски, торцевые рванины. Дефекты макроструктуры: ликвационные полосы, точечная неоднородность, осевая химическая неоднородность, центральная пористость, светлый контур и другие.

Причинами возникновения таких дефектов могут быть разные технологические факторы, такие как износ кристаллизатора, неравномерное охлаждение кристаллизатора, повышенная загрязненность стали включениями, недораскисленный металл, отклонения НЛЗ от технологической оси, трение о направляющие ручья (стенки кристаллизатора).

Наиболее характерные дефекты, связанные с особенностями формирования сплошных и полых непрерывнолитых круглых заготовок показаны на рисунке 1: овальность профиля поперечного сечения (1), разнотолщинность полый заготовки (2), продольные «горячие» трещины на наружной (3) и внутренней (4) поверхности полый заготовки, продольные ужимины (5), внутренние радиальные трещины (6), а также дефекты затвердевания: пористость (7) и ликвация (8), осевые паукообразные трещины в сплошной заготовке (9) и расслоение по стыку фронтов кристаллизации (10) в полый заготовке [7].

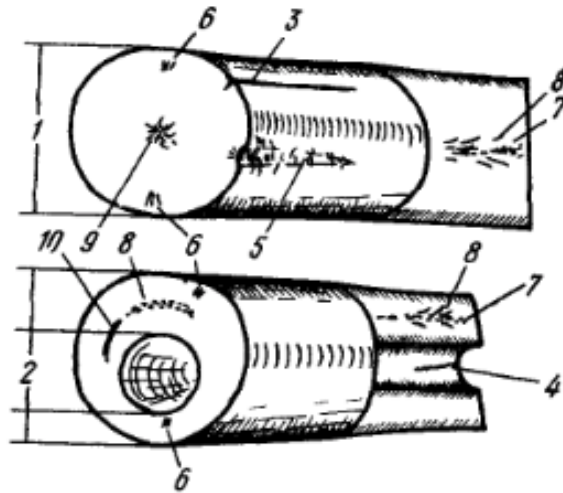


Рис. 1 – Основные виды дефектов сплошных (а) и полых (б) заготовок цилиндрического сечения.

В ЦНИИчермет им. И.П. Бардина разработаны шкалы баллов для оценки макроструктуры сплошных и полых заготовок круглого сечения, основанные на визуальной оценке степени развития дефектов внутреннего строения по данным контроля травленных поперечных темплетов и серных отпечатков [7].

Визуальная оценка в баллах степени развития данного дефекта приведена ниже.

А. Осевая рыхлость сплошных заготовок:

I балл – повышенная травимость в центре или отдельные поры;

II балла – повышенная травимость и пористость в виде мелких точек диаметром $< 1\text{ мм}$;

III балла – Отдельные поры в центре диаметром $\leq 3\text{ мм}$;

IV балла – грубая усадочная пора в центре диаметром $> 3\text{ мм}$.

Б. Осевая ликвация сплошных заготовок:

I балл – отдельные мелкие ликвационные точки;

II балла – много мелких ликвационных точек;

III балла – небольшие группы ликвационных точек и пятен.;

IV балла – много грубых ликвационных пятен или грубое большое пятно в центре.

В. Ликвационные полосы в промежуточной зоне сплошного слитка:

I балл – отдельные или групповые слегка намечающиеся ликвационные полосы;

II балла – более грубые отдельные или групповые (до двух групп) ликвационные полосы;

III балла – значительная пораженность групповыми ликвационными полосками (более двух групп);

IV балла – отдельные или групповые грубые ликвационные полосы по всему периметру заготовки.

Г. Рыхлость в зоне стыка фронтов кристаллизации в полом слитке:

I балл – повышенная травимость или почернение отдельных участков;

II балла – повышенная травимость или мелкие поры диаметром ≤ 1 мм;

III балла - повышенная травимость или мелкие поры диаметром ≤ 3 мм;

IV балла - повышенная травимость или мелкие поры диаметром > 3 мм.

Д. Осевая ликвация в зоне стыка фронтов кристаллизации в полом слитке:

I балл – отдельные мелкие ликвационные точки;

II балла – много мелких ликвационных точек;

III балла – отдельные грубые ликвационные точки и пятна;

IV балла – большие скопления грубых ликвационных точек и пятен.

При отсутствии какого-либо из перечисленных дефектов качество заготовки по данному дефекту оценивают нулевым баллом. Если степень развития дефекта находится между двумя соседними баллами, то оценка может быть выражена дробным показателем (0,5; 1,5; 2,5; 3,5).

Также основные виды дефектов круглых заготовок приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Общая характеристика дефектов формы, поверхности и макроструктуры непрерывнолитой заготовки круглого сечения [8]

Наименование дефекта	Описание дефекта	Причины возникновения	Меры по предупреждению
1	2	3	4
1.Раздутие (выпуклость)	Овальность профиля поперечного сечения	Высокая скорость или температура разливки, недостаточное охлаждение гильзы кристаллизатора, неудовлетворительная настройка правильно-тянущей клетки	Соблюдение температурного и скоростного режима разливки, режимов охлаждения, контроль геометрических параметров кристаллизатора
2.Продольная трещина	Трещина, проходящая вдоль оси заготовки	Износ донной части кристаллизатора, неравномерное охлаждение заготовки в кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения (ЗВО), повышенная температура стали в промковше, высокое содержание вредных примесей (S, P, Sn, Pb, Sb)	Контроль за геометрическими параметрами кристаллизатора, поддержание оптимальной температуры разливки, ограничение содержания вредных примесей и пр.

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4
3. Поперечные трещины	Трещина, проходящая по боковой поверхности граней поперек продольной оси заготовки	Неравномерное затвердевание заготовки, повышенное трение слитка в кристаллизаторе, действие циклических надрывов оболочки при качании кристаллизатора, зависание слитка в кристаллизаторе, нерациональный режим охлаждения в ЗВО	Соблюдение температурного интервала разливки, контроль за состоянием кристаллизатора, соблюдение режимов вторичного охлаждения, соблюдение режимов смазки и пр.
4. Поры	Углубления или полые пространства на поверхности заготовки	Избыточная влажность или избыточное количество смазочного масла с завышенным кислотным числом, газовыделение из смазочного материала у края кристаллизатора	Регламентированное использование смазочного материала, обеспечение требуемой раскисленности стали
5. Следы качания кристаллизатора	Надрывы оболочки заготовки в виде поперечных углублений	Неправильный выбор режимов качания кристаллизатора, смазки, температуры разливки, неправильная настройка поддерживающих роликов	Соблюдение оптимального режима возвратно-поступательного движения кристаллизатора, контроль за состоянием кристаллизатора

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4
6.Загрязнения на поверхности заготовки	Скопление неметаллических включений в виде частично залитых металлом частиц шлака	Размыв огнеупоров ковша, затягивание шлака из промковша, всплывшие из металла продукты вторичного окисления	Соблюдение технологии внепечной обработки стали, применение огнеупоров высокого качества и качественной ШОС в кристаллизаторе
7.Паукообразные трещины	Расходящиеся от центра тонкие трещины	Внутренние напряжения вследствие местного экстремального периодического пере-охлаждения или разогрева поверхности заготовки	Использование специальных ШОС в совокупности с равномерной подачей водовоздушной смеси в зоне вторичного охлаждения
8.Осевые трещины	Чаще всего имеют «паукообразный» вид	Вследствие термических напряжений, возникающих при неправильном выборе режимов в зоне вторичного охлаждения	Оптимизация режимов подачи воды в зоне вторичного охлаждения, повышение однородности водовоздушной смеси

1.3 Влияние технологических и теплотехнических факторов на качество непрерывнолитых заготовок

В настоящее время в области непрерывной разливки стали основное внимание уделяется повышению качества продукции, снижению издержек производства стали, повышению срока эксплуатации оборудования и его универсальности. В этом направлении проводится модернизация существующих технологических узлов МНЛЗ. Одной из основных производственных задач при непрерывной разливке стали является решение практической проблемы управления процессами кристаллизации и охлаждения с целью обеспечения условий формирования качественной непрерывнолитой заготовки. В связи с повышением скоростей разливки стали, расширением марочного состава разливаемых сталей и повышением требований к качеству металла особую важность приобретают вопросы изучения природы возникновения различных дефектов непрерывнолитых заготовок и разработки практических мер по их предотвращению. Вопрос повышения качества непрерывнолитых заготовок является сложной комплексной проблемой, для решения которой необходимо в общем случае рассмотреть целый ряд взаимосвязанных явлений и факторов, влияющих на процесс формирования непрерывнолитой заготовки.

Все эти факторы можно условно разделить на три группы:

- конструктивные;
- технологические;
- теплотехнические.

Анализ отечественного опыта и зарубежных данных [9,10,11] позволяет определить основные технологические и конструктивные параметры, которые должны подвергаться контролю, стабилизации и оптимизации с целью создания стандартной бездефектной технологии получения высококачественных непрерывнолитых заготовок.

Известно, что на появление внутренних трещин в слябах оказывают влияние механические напряжения, действующие на заготовку в зоне вторичного охлаждения, вследствие изгиба, выпрямления или прокатки затвердевшей оболочки заготовки с жидкой сердцевиной при изогнутых зажатых роликах и при нарушении настройки роликовой проводки МНЛЗ. А на формирование поверхностных трещин - термические напряжения, зависящие от температуры жидкой стали и организации теплоотвода от поверхности непрерывнолитой заготовки, что на сегодняшний день требует дополнительных исследований.

Возможность предотвращения образования или подавления развития кристаллизационных, усадочных и ликвационных дефектов многие исследователи связывают с созданием управляемого принудительного движения жидкой фазы кристаллизующейся заготовки. Применяют различные физико-химические методы воздействия на жидкий металл в процессе кристаллизации: механическое, магнитное и гидродинамическое перемешивание, обработка ультразвуком, введение микрохолодильников и центров кристаллизации.

В соответствии с особенностями кристаллизации непрерывнолитой заготовки в технологической линии МНЛЗ делаются попытки осуществить электромагнитное перемешивание в трех, а иногда и четырех уровнях - в кристаллизаторе, зоне вторичного охлаждения, зоне окончания затвердевания.

Авторами работы [12] установлена зависимость склонности образования тех или иных дефектов непрерывнолитой заготовки от их химического состава. В результате весь сортамент разливаемых марок сталей разделен на несколько групп по склонности к образованию внутренних и поверхностных трещин, что дает возможность рационального подбора технологических параметров разливки.

Снижение содержания серы в металле с целью получения бездефектных заготовок стало одним из основных направлений отечественной и мировой

практики. Показано, что при содержании в составе непрерывнолитой заготовки серы менее 0,005 % ликвационные полосы практически отсутствуют.

Процесс раскисления в определенной степени является решающим для достижения требуемого качества литых заготовок. Эффективность раскисления в основном зависит от количества остаточного алюминия. При содержании алюминия менее 0,01 % (стали Ст. 10, Ст.20) пузыри в подповерхностной зоне отсутствуют.

Одним из наиболее важных параметров, определяющих стабильность процесса разливки, характер затвердевания и макроструктуру непрерывнолитых заготовок, является температура металла. При разливке металла с пониженной температурой происходит затягивание каналов разливочных стаканов в промежуточном ковше. Возникает необходимость частых прожиганий и изменений скорости разливки, нарушается стабильность технологического режима. Разливка перегретого металла ведет к увеличению загрязненности заготовок неметаллическими включениями, возникновению опасности прорывов, ухудшению качества макроструктуры. Как показывает опыт работы сортовых МНЛЗ, рабочая температура разливки должна превышать на 20-35 °С температуру ликвидуса для данной марки стали [13].

Продувка инертным газом в сталеразливочном ковше повышает температурную и химическую однородность металла, существенно облегчает процесс разливки. Разработанный и внедренный на отечественных заводах способ продувки аргоном через стопоры в промежуточном ковше улучшает качество поверхности, стабилизирует процесс разливки, создает более благоприятные условия для удаления неметаллических включений [14].

В настоящее время, в условиях постоянно расширяющегося марочного сортамента стали, наиболее актуальной задачей является повышение качества непрерывнолитых заготовок.

Охлаждение непрерывнолитой заготовки в ЗВО является одной из основных технологических операций, определяющих качество её поверхности.

Обычно, говоря о ЗВО, подразумевают ту часть МНЛЗ под кристаллизатором, где охлаждение заготовки проходит интенсивнее, чем просто при охлаждении на воздухе. Следовательно, зона вторичного охлаждения заготовки начинается непосредственно под кристаллизатором. Это обуславливается тем фактором, что твердая оболочка металла, сформировавшаяся в кристаллизаторе, еще весьма тонкая и недостаточно прочная и требует дальнейшего наращивания [15, 16].

Чаще всего применяется форсуночное охлаждение. В настоящее время используются два типа форсуночного охлаждения:

- однокомпонентное водяное (спрейерное);
- двухкомпонентное водовоздушное.

Так, для однокомпонентного водяного охлаждения применяют многофорсуночные системы, включающие форсунки для формирования факелов плоской, конусообразной или овальной формы, а также однофорсуночные устройства для формирования плоской струи с широким углом распыления [17].

Для обеспечения равномерного мягкого охлаждения непрерывнолитых заготовок на современных МНЛЗ широко используется двухкомпонентное водовоздушное охлаждение, позволяющее в значительной мере устранить недостатки, присущие однокомпонентному водяному охлаждению и заметно повысить качество поверхности и внутренней структуры непрерывнолитого металла. Для двухкомпонентного водовоздушного охлаждения используют форсунки, формирующие плоские и конусообразные водовоздушные факелы [18,19].

С точки зрения технологии непрерывной разливки стали водовоздушное охлаждение имеет ряд преимуществ перед чисто водяным:

- более широкий диапазон регулирования интенсивности охлаждения при низкой локальной неоднородности теплоотвода;
- более высокая стабильность распыления и теплоотвода при колебаниях режимных параметров;

- высокая эффективность использования воды как охладителя;
возможность гибкого изменения закономерностей теплоотвода с поверхности заготовки.

Наряду с определенным разнообразием применяемых или рекомендуемых к применению устройств и систем, разработка режимов вторичного охлаждения с применением водовоздушных смесей затруднена вследствие недостаточной изученности гидродинамических и теплофизических закономерностей процесса водовоздушного охлаждения высоконагретых поверхностей при температуре (600 ... 1200) °С, характерной для непрерывной разливки стали.

Для разработки единой системы вторичного водовоздушного охлаждения, предназначенной для разливки широкого сортамента стали, был проведен комплекс исследований [20] по изучению гидравлических и теплотехнических характеристик устройств охлаждения.

Наиболее грубыми и часто встречающимися внутренними дефектами являются трещины, перпендикулярные продольной оси слитка, которые называют гнездообразными. Установлено, что такие трещины зарождаются вблизи границы с жидкой фазой в горячих (>1300 ... 1350 °С) слоях корочки заготовки.

Образование трещин происходит при возникновении в «опасной» зоне корочки растягивающих напряжений вдоль оси заготовки, превышающих прочность стали при данной температуре. Известно, что вероятность появления таких трещин возрастает при повышенном содержании в стали углерода, вредных примесей, особенно серы [21].

При исследовании влияния изменения температуры поверхности заготовки на напряженно-деформированное состояние корочки установлено, что вторичный разогрев поверхности заготовки вызывает в опасных слоях корочки растягивающие напряжения, которые при определенных условиях могут превышать критические значения [22].

Процесс охлаждения, который определяет затвердевание непрерывнолитой заготовки в ЗВО, существенно отличается от охлаждения при затвердевании обычной заготовки. Основные влияющие факторы при этом: равномерность охлаждения, интенсивность охлаждения, температура разливки.

При этом напряжения, возникающие в непрерывнолитой заготовке, можно классифицировать следующим образом:

- термические напряжения, связанные с интенсивным вторичным охлаждением,
- механические напряжения, связанные с давлением тянущих валков,
- напряжения превращения.

Причиной возникновения термических напряжений в затвердевающей корочке являются различные скорости охлаждения по толщине и периметру, а также наличие фазовых превращений, связанных с полиморфизмом железа. Поэтому для ограничения развития трещин в литых заготовках вторичное охлаждение должно обеспечивать плавное и равномерное понижение температуры поверхности с момента выхода заготовки из кристаллизатора вплоть до полного затвердевания. При этом стоит отметить, что влияние тепловых режимов охлаждения на возникающие термические напряжения в отливаемых заготовках на сегодняшний день требуют более детального анализа и изучения.

1.4 Теплофизические основы процессов охлаждения и затвердевания стали при непрерывной разливке

Затвердевание расплава (или плавление тела) характеризуется перемещением границы раздела фаз и выделением (поглощением) тепла на межфазной поверхности. Точные решения задач такого типа возможны только для немногих, наиболее простых случаев, к которым, в частности, относятся задачи затвердевания (плавления) полубесконечного массива при граничных условиях первого рода [23, 24].

Впервые такая задача была решена в 1831 г. Ляме и Клапейроном для случая промерзания талого грунта. В 1890 г. Стефаном была решена задача об образовании льда в северных морях, причем решение было получено на основе автомодельности температурного поля, заключающегося в том, что при определенном законе движения межфазной границы характер распределения температурного поля в каждой фазе остается неизменным. Задачи такого типа получили название задач Стефана. Реальные условия затвердевания расплава значительно отличаются от принятых в задаче Стефана (он предполагал, что в момент времени $t=0$ температура на поверхности объема мгновенно падает до температуры поверхности, меньшей, чем температура кристаллизации). Поскольку строгое решение задачи отсутствует, как правило, применяют те или иные упрощения. Обычно принимают какое-либо распределение температур по толщине затвердевшей корочки и в жидком металле, удовлетворяющее начальным и граничным условиям. Впервые такой подход использовал в 1931 г. Л.С. Лейбензон. При рассмотрении задач затвердевания металла А.И. Вейник принял ряд допущений, ограничивающих применение приведенного решения для анализа реального процесса кристаллизации сплава. К их числу относятся отсутствие перегрева жидкой фазы относительно температуры кристаллизации; отсутствие конвективного теплопереноса в жидкой фазе; принятие плоской поверхности раздела фаз и т.д.

Другой подход к решению задачи, развиваемый в работах Ю.А. Самойловича [25,26], основан на квазиравновесной модели кристаллизации, согласно которой диффузионные процессы в жидкой и твердой фазах успевают полностью завершиться. Белорусские специалисты под руководством В.И. Тимошпольского как бы приняли эстафету от Екатеринбургских специалистов, возглавляемой Ю.А. Самойловичем научной школы. Причем сотрудничество между Ю.А. Самойловичем и В.И. Тимошпольским продолжается в течение последних 20 лет. Это очевидно из большого количества совместных публикаций.

Модернизировались и методы расчетов при остывании (затвердевании) слитков в изложницах. Следует отметить теоретические работы отечественных ученых-металлургов. Особое место при этом занимают расчетно-теоретические работы Г.П. Иванцова, А.И. Вейника, Э.М. Гольдфарба, Л.С. Лейбензона, Б.Я. Любова и другие.

Д.П. Евтеевым определены основные факторы, влияющие на теплообмен между заготовкой и кристаллизатором, которые разделены на три группы [27]:

- постоянно действующие технологические (марка стали, температура металла, скорость разливки);
- конструктивные и режимные (длина, конусность, материал и толщина стенок, режим охлаждения);
- непостоянно действующие факторы (деформация оболочки заготовки, несимметричное ее положение и др.)

Д.П.Евтеев совместно с другими специалистами ЦНИИчермет им. И.П. Бардина выделил 8 групп [27] разливаемых заготовок по маркам стали и сортаменту, которые определяются особенностями и характерными дефектами затвердевания, присущими той или иной группе.

Для заготовок разного сечения требуется характерный рациональный режим охлаждения.

Режим вторичного охлаждения стальной заготовки должен удовлетворять следующим требованиям: температура поверхности заготовки должна снижаться в зоне вторичного охлаждения непрерывно вплоть до момента выхода затвердевающей заготовки в зону воздушного охлаждения, чтобы свести к минимуму растягивающие напряжения во внутренних слоях твердой корочки (недопустим разогрев поверхности на каком-либо участке); температура поверхности зоны в конце зоны затвердевания должна быть не ниже 800 °С; недопустимы резкие изменения в интенсивности теплоотвода при выходе заготовки из кристаллизатора; недопустимо раздутие поверхности заготовки под влиянием ферростатического давления жидкой стали на величину более 5 % диаметра [28].

Для получения качественной заготовки необходимо уменьшать градиенты температурного поля заготовки, особенно по толщине формирующейся оболочки [21, 29], сохранять примерно одинаковое их значение от фронта затвердевания до поверхности и эквидистантность распределений температур в оболочке в различные моменты времени [21, 30].

Следует заметить, что по вопросу о том, с какой интенсивностью охлаждать заготовку на том участке МНЛЗ, где завершается процесс кристаллизации, мнения исследователей расходятся. Кроме того, нет достаточных исследований влияния несимметричности граничных условий охлаждения на возникающие термические напряжения в непрерывнолитой заготовке в зоне вторичного охлаждения.

Рациональным с точки зрения механических напряжений следует считать такой режим охлаждения, при котором величина отношения максимального напряжения к временному является постоянной для любого горизонтального сечения заготовки и при заданном уровне запаса прочности в заготовке минимальна [20]. В работах [11, 31] поиски рационального режима проводят, исходя из параметров напряженного состояния заготовки с привлечением понятий и положений механики разрушения твердого тела. Использование функционалов температурного поля в качестве критериев рациональности для оптимизации режимов охлаждения характерно и для работ [26,32]. Детальное рассмотрение теплообмена в ЗВО основано на анализе механизма взаимодействия капельного потока с нагретой поверхностью [33, 34, 35]. При движении капли от форсунки к поверхности она претерпевает следующие процессы: тепловую релаксацию, частичное испарение в процессе движения, взаимодействие с поверхностью и эвакуацию капли. Взаимодействие капли с поверхностью определяет основной теплоотвод от этой поверхности.

По данным А.А.Скворцова и А.Д. Акименко [36, 37] в зоне вторичного охлаждения действующих установок основное количество тепла отводится от заготовки охлаждающей водой и паром, получающимися при частичном испарении воды в условиях соприкосновения ее с нагретой поверхностью

заготовки. Поток излучения с поверхности заготовки, нагретого до (900...1000) °С, почти полностью экранируется паровой пленкой и слоем воды, покрывающих поверхность слитка при форсуночном водяном охлаждении.

Теплообмен при охлаждении высокотемпературной поверхности струями распыленной жидкости, истекающей из плоскофакельных и круглофакельных форсунок, исследован в работе [38], где предложена эмпирическая формула для определения коэффициента теплоотдачи от поверхности вида:

$$\alpha = 138,209 \cdot 10^3 \cdot g + 36,4 \cdot p - 1,08 \cdot 10^3 \cdot p \cdot g, \quad (1)$$

где g – плотность орошения, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$;

p – избыточное давление жидкости перед форсункой, Па.

Для зоны непосредственного орошения водой распределение коэффициента теплоотдачи по длине зоны можно представить в виде [39]:

$$\alpha_r = 1500 \cdot \exp\left(\sqrt{z_r} / 0,002\right), \quad (2)$$

где z_r – координата по длине зоны, м.

Для следующей за ней зоны охлаждения на воздухе можно использовать выражение для определения коэффициента теплоотдачи α_A , учитывающего теплоотдачу излучением и свободной конвекцией, которое получили аппроксимацией данных работы [36] в работе [25]:

$$\alpha_A = 12,8 \cdot \exp(0,00241 \cdot T_n), \quad (3)$$

где T_n – температура поверхности заготовки, °С.

Для следующей зоны стекающей пароводяной пленки значение α_w можно принять постоянным из диапазона 175 - 230 Вт/(м²·К) [40, 41].

В конце ЗВО прекращается принудительное водяное охлаждение. Эта область характеризуется свободным охлаждением заготовки на воздухе, где непрерывнолитая заготовка продолжает охлаждаться за счет излучения, свободной конвекции, а также теплопроводностью в ролики по механизму контактного теплообмена. Основное количество тепла отводится от заготовки за счет излучения в окружающее пространство. Плотность теплового потока при охлаждении на воздухе [42, 43]:

$$q_B = \varepsilon_M \cdot C_0 \cdot \left[(T_n / 100)^4 - (T_B / 100)^4 \right] + \alpha_K \cdot (T_n - T_B), \quad (4)$$

где ε_M – степень черноты металла;

T_n, T_B – температура поверхности заготовки и окружающего воздуха, К;

α_K – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м²·К);

C_0 – коэффициент излучения абсолютно чёрного тела, Вт/(м²·К⁴).

Система охлаждения непрерывнолитой заготовки в качестве необходимого компонента должна включать в себя подсистему управления процессами теплообмена в ЗВО МНЛЗ, которая обычно является частью общего комплекса АСУ ТП МНЛЗ. Управление вторичным охлаждением предполагает изменение расходов воды по секциям ЗВО в соответствии с маркой стали, сечением заготовки, текущей скоростью вытягивания и некоторыми другими параметрами для обеспечения рациональных условий формирования металла на достаточно протяженном и ответственном участке технологической линии МНЛЗ. При этом наиболее сложным является осуществление управления подачей охладителя в переходные периоды работы МНЛЗ, когда состояние непрерывной заготовки нельзя рассматривать как квазистационарное [44, 45]. Для реализации общепризнанной цели такого

управления - обеспечения оптимальных условий охлаждения в переходный период - различные авторы предлагают разные способы управления [46, 47, 48].

Так как в случае форсуночного охлаждения коэффициент теплоотдачи напрямую зависит от распределения плотности орошения, то задача ее определения становится не менее важной [49]. Для решения этой задачи необходимо проведение экспериментов с различными форсунками и создание методик обработки и обобщения данных с целью дальнейшего создания математической модели форсунки. В связи со сложностью технического выполнения форсунок с заданными параметрами немаловажно использование нескольких разбрызгивающих устройств в одном ряду, что так же требует тщательного исследования и анализа.

Основной проблемой проектирования ЗВО является распределение коэффициентов теплоотдачи по сечению заготовки таким образом, чтобы температурная неравномерность после кристаллизатора выравнивалась к концу ЗВО в соответствии с требованиями, предъявляемыми к рациональному режиму охлаждения [50, 51].

1.5 Тенденции развития технологии непрерывной разливки стали

Непрерывная разливка стали прочно утвердилась и заняла достойное место среди новейших разработок в практике металлургического производства. Огромный вклад в освоение и развитие технологии непрерывной разливки внесли сотрудники ЦНИИчермет им. И.П. Бардина, многие из которых являются основоположниками данной технологии в Советском Союзе. В частности, именно ими была спроектирована, разработана и запущена в 1952 году первая в СССР установка полунепрерывной разливки стали, которая в определенный период явилась экспериментальной базой для дальнейшего развития этого процесса. Данные работы были отмечены в 1952 году первой в области непрерывной разливки стали Сталинской премией (М.С. Бойченко,

В.М. Кутырина, Г.К. Ламинцев, Н.А. Николаев, В.С. Рутес, В.В. Фульмахт) [2, 52].

Более чем полувековой опыт использования новых способов разливки стали привел к кардинальному переустройству сталеплавильного и существенным изменениям прокатного производств. Значительные изменения, по отношению к начальному периоду освоения процесса, претерпели как технологические аспекты разливки, так и конструктивные решения машин непрерывного литья заготовок.

Следует отметить, что основополагающие принципы непрерывной разливки жидкой стали в водоохлаждаемый кристаллизатор и непрерывное вытягивание затвердевающей заготовки сохранились. А все последующие усовершенствования и трансформации превратили МНЛЗ в современный, эффективный, высокомеханизированный агрегат с высоким уровнем контроля и управления процессом. Можно сказать, произошла смена поколений МНЛЗ.

Усовершенствования технологического процесса затрагивают [12, 53]:

а) сталеразливочный ковш – применение крышек для снижения теплотерь, шиберных затворов вместо стопоров, датчиков определения шлака в конце разливки из ковша;

б) промежуточный ковш – оптимизация геометрии и емкости, потоков металла, установка перегородок и фильтров, оснащение ковшей приемными и выпускными камерами, повышение возможности всплытия и ассимиляции включений покровным шлаком, применение плазменного подогрева стали в ковше, горячего оборота ковшей, применение торкретированной футеровки ковшей;

в) кристаллизаторы – использование различных способов охлаждения кристаллизаторов, переменная конусность по высоте, нанесение покрытий на рабочую поверхность стенок кристаллизаторов, изменение ширины отливаемых слабов в процессе разливки, предупреждение прорывов, применение новой конструкции системы возвратно-поступательного движения кристаллизатора рессорного типа с гидравлическим или электромеханическим приводом,

обеспечивающий широкий диапазон частоты и шага качания по различным законам движения и высокую точность относительно технологической оси МНЛЗ;

г) вторичное охлаждение – переход на динамическую систему управления водяным или воздушным охлаждением заготовки в зависимости от ее теплового состояния (тепловая модель учитывает скорость разливки, марку стали, температуру перегрева стали, температуру поверхности заготовки в ЗВО) [54, 55];

д) роликовую проводку слабовых машин – применение роликов с промежуточными опорами и внутренним охлаждением, автоматическое регулирование раствора роликов, повышение надежности узла подшипников роликов и их смазки (практически устранение закоксованности и потери подвижности);

е) электромагнитное многоуровневое перемешивание (ЭМП) жидкой стали в кристаллизаторе и ЗВО, включая электромагнитное торможение, ограничивающее глубину проникновения струи в полость затвердевающей заготовки.

ж) мягкое обжатие заготовки на базе математического моделирования процесса кристаллизации в зависимости от расходов хладагентов, скоростного режима, включая технологические замедления разливки, связанные с перековшовками, заменами погружных стаканов и прочим, а также границ зоны осуществления мягкого обжатия.

Система работает в автоматическом режиме слежения за концом лунки жидкой фазы, величиной сближения фронтов кристаллизации, позиционированием гидроцилиндров на мягкое обжатие и осуществление гидродинамического давления. Используется при разливке слабов, блюмов, круглой заготовки [56].

з) новые виды высокостойких огнеупоров, включая погружные стаканы, стойкие к зарастанию и обеспечивающие разливку до 8 часов без их замены;

и) беззаворотные затравки, обеспечивающие плавный пуск МНЛЗ без рывков;

к) оптимальные составы шлакообразующих смесей для различных групп марок стали и сечений кристаллизаторов, включая тонкослябовые; автоматизированная подача шлакообразующих смесей (ШОС);

л) автоматический пуск МНЛЗ и замена дозаторов на лету при разливке мелкосортных заготовок.

Реализация этих решений обеспечивает достижение высоких скоростей разливки, сокращение времени на проведение вспомогательных операций при обслуживании МНЛЗ, разливку стали крупными сериями и получение практически бездефектных непрерывнолитых заготовок, пригодных для горячего посада и прямой прокатки и определяет дальнейшее развитие традиционной, классической непрерывной разливки [40,45].

Несмотря на достигнутые успехи, происходит непрерывное совершенствование технологии и оборудования МНЛЗ. Значительные усилия ученых и практиков-металлургов направлены на изучение закономерностей кристаллизации, теплотехники непрерывнолитой заготовки, создание энергосберегающих технологий, создание МНЛЗ, производящих продукцию близкую к конечным размерам – тонкослябовые и валковые МНЛЗ. Важным моментом является создание и внедрение технологических схем на базе совмещенных процессов, трансформируемых в литейно-прокатные агрегаты (модульные технологии) [49,57].

1.6 Принцип работы и теплообмен в кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения

1.6.1 Принцип работы и теплообмен в кристаллизаторе

Кристаллизатор является важнейшим технологическим узлом любой установки непрерывной разливки, так как в нем происходит формирование заготовки.

Основное назначение кристаллизатора – это формообразование заготовки и отвод от кристаллизующейся стали такого количества тепла, которое обеспечивает условия для непрерывного формирования твердой оболочки заготовки достаточной толщины и прочности, чтобы она не разрушалась под действием трения и ферростатического давления на выходе из кристаллизатора. Тепловая работа кристаллизатора в значительной мере определяет качество непрерывнолитой заготовки.

Для обеспечения высокой интенсивности теплоотвода применяют кристаллизаторы с водяным охлаждением. При промышленном использовании конструкция кристаллизатора должна обеспечить высокое качество непрерывнолитых заготовок из сталей многих марок; необходимую скорость вытягивания заготовки; стабильность и надежность процесса непрерывной разливки; высокую стойкость, обеспечивающую рентабельную работу всей установки; безопасность работы [1,14].

В любой МНЛЗ кристаллизатор выполняет функции первичного холодильника, отводящего до 30% теплоты расплава, и формообразователя, обеспечивающего заданную форму поперечного сечения заготовки. По принципу работы – это теплообменник, основной задачей которого является создание необходимых условий для интенсивного отвода теплоты от жидкого металла. В результате по его периметру происходит непрерывное формирование внешней оболочки – корочки будущей заготовки. Обязательным условием нормальной работы кристаллизатора является обеспечение на выходе из него корочки необходимой толщины с прочностью, превышающей ферростатическое давление находящегося в ней жидкого металла и усилий вытягивания.

Тепловой режим кристаллизатора организуется так, чтобы на выходе твердая оболочка заготовки была достаточной по толщине и прочности для

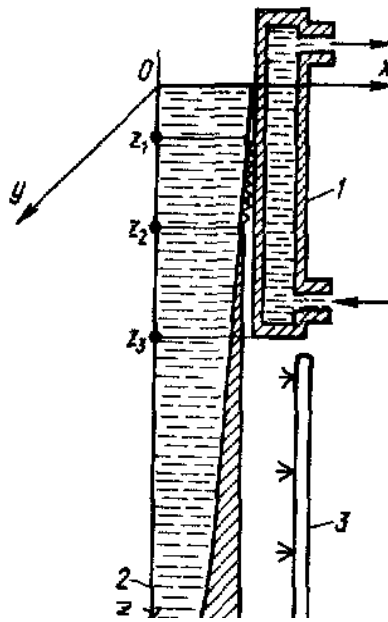
предотвращения возможности прорыва металла. Распределение интенсивности теплоотвода по периметру и длине заготовки должно обеспечивать отсутствие опасных напряжений, которые могли бы привести к появлению трещин. Роль кристаллизатора как теплообменника сводится к тому, что теплота от жидкой стали через стенку кристаллизатора передается охлаждающей воде. Толщина оболочки заготовки на выходе из кристаллизатора зависит от скорости разливки, физических свойств стали и размеров заготовки. При повышении скорости разливки толщина корочки заготовки на выходе из кристаллизатора уменьшается, а тепловой поток при этом возрастает.

Основные требования рационального режима в кристаллизаторе сформулированы Д.П. Евтеевым совместно с другими ведущими специалистами ЦНИИчермет им. И.П. Бардина [2]:

- монотонное снижение температуры поверхности заготовки по всей длине кристаллизатора;
- равномерное распределение температуры по периметру заготовки;
- обеспечение температуры поверхности в конце кристаллизатора выше температуры горячеломкости (в интервале 1100-1200 °С);
- равенство градиентов температур на внутренней и внешней поверхностях затвердевающей корочки;
- толщина затвердевающей корочки на выходе из кристаллизатора должна находиться в пределах (20...30) мм.

Соблюдение этих требований способствует обеспечению рациональных режимов охлаждения заготовок в кристаллизаторе и получению конечного продукта с минимальным количеством дефектов.

По мнению многих авторов [42,58] в процессе вытягивания заготовка проходит четыре зоны охлаждения: плотного контакта ($0 < z < z_1$), пульсирующего контакта ($z_1 < z < z_2$), газового зазора ($z_2 < z < z_3$) и вторичного охлаждения ($z > z_3$), рисунок 2.



1 – кристаллизатор; 2 – заготовка; 3 – зона вторичного охлаждения

Рис. 2 – Упрощённая схема вертикальной установки непрерывного литья
стальных заготовок круглого сечения

Помимо газовых полостей микрозаливин отдельные части корочки отделяют от стенок кристаллизатора дополнительные зазоры, которые образуются при короблении оболочки. Причина коробления – температурные напряжения и отчасти давление жидкого металла сердцевины на оболочку заготовки. Оболочка заготовки достаточно жесткая и возникшее коробление обычно сохраняет свое положение на оболочке до конца затвердевания всего металла, особенно если коробление возникает на достаточно толстой корочке. В зависимости от толщины образующегося зазора, коробление приводит к различным результатам.

В настоящее время разливка проводится с применением шлакообразующих смесей, которые заполняют зазор и оказывают существенное влияние на величину термического сопротивления.

Разливка металла под слоем шлака стабилизирует теплоотвод особенно в верхней части кристаллизатора. Поверхность затвердевшей оболочки заготовки

отделена от стенок кристаллизатора шлаковым гарниссажем. Несмотря на то, что теплопроводность шлака значительно меньше, чем металла [теплопроводность шлаковых покрытий в зависимости от состава и температуры колеблется в пределах 0,4 - 2,2 Вт/(м·К), но в сотни раз больше теплопроводности газов.

В начальный момент затвердевания в зоне мениска наличие шлаковой прослойки снижает теплоотвод от жидкого металла к охлаждающей воде, в нижней же части кристаллизатора шлаковая прослойка уменьшает вредное влияние газового зазора и увеличивает теплоотвод от заготовки к кристаллизатору.

Стоит также отметить, что сегодня скорость разливки обычно принимают 0,4-0,8 м/мин в зависимости от марки разливаемой стали, температуру на выходе из кристаллизатора получают в интервале 1100 °С – 1200 °С, а толщину корочки стараются обеспечивать не меньше 20-30 мм, чтобы исключить любые прорывы жидкого металла на выходе из кристаллизатора [2,3,39, 59].

1.6.2 Принцип работы и теплообмен в зоне вторичного охлаждения

Вторичное охлаждение заготовки начинается непосредственно под кристаллизатором, что обуславливается тем фактом, что твердая корочка металла, сформировавшаяся в нем, еще весьма тонкая и недостаточно прочная.

Назначение зоны вторичного охлаждения – дальнейшее затвердевание непрерывнолитой заготовки после её выхода из кристаллизатора. В пределах ЗВО необходимо решить две основные задачи: осуществить отвод тепла для окончания процесса затвердевания, обеспечив необходимую интенсивность охлаждения заготовки, при которой достигается равномерное и непрерывное снижение температуры поверхности, что способствует повышению качества заготовки и сохранению необходимой формы [60].

В соответствии с этим в ЗВО предусмотрена система охлаждения заготовки (например, форсуночная), а также поддерживающая система (роликовая и др.). Из всего количества тепла, отводимого от непрерывнолитой

заготовки в пределах МНЛЗ, на долю зоны вторичного охлаждения приходится более 70 %. Охлаждение заготовки в ЗВО может проводиться водой или другими теплоносителями.

По принципу действия и устройству различают две принципиально разные конструкции ЗВО: открытого и закрытого типов [61].

В первом из них происходит подача охлаждающей воды или другого теплоносителя непосредственно на поверхность заготовки с помощью специальных разбрызгивающих устройств (например, форсунок).

Во втором случае охлаждение осуществляется в закрытых водоохлаждаемых экранах или путем непосредственного соприкосновения заготовки с поверхностью водоохлаждаемого элемента.

До настоящего времени более широкое распространение получили ЗВО открытого типа с роliko-форсуночным охлаждением непрерывнолитой заготовки.

По мере развития непрерывной разливки стали применялись различные методы водяного охлаждения: струйное, форсуночное, роliko-форсуночное, форсуночно-брусевое, роlikовое (бесфорсуночное), панельное. Эти способы отличаются интенсивностью и расходами воды [62].

Струйное охлаждение обеспечивает наибольшую интенсивность, однако при этом происходит резкое переохлаждение поверхности заготовки, получается большой перепад температур по толщине корочки, что может привести к образованию значительных термических напряжений.

Форсуночное охлаждение позволяет снизить интенсивность охлаждения, удельные расходы при этом составляют 1–2 л/кг.

Роliko-форсуночное охлаждение предусматривает подачу воды, распыляемой форсунками, на поверхность заготовки между опорными роliками поддерживающей системы. Этот способ позволяет обеспечить «смягченный» режим охлаждения с удельными расходами воды 0,5–1 л/кг.

Рельсо-форсуночный (или форсуночно-брусевой) способ охлаждения с подачей воды между брусьями аналогичен роliko-форсуночному.

При роликовом способе охлаждающая вода из отводов в коллекторе подается под малым давлением непосредственно на ролики, что обеспечивает безударное охлаждение их поверхности. Охлаждение заготовки происходит за счет контактного теплообмена между холодными роликами и поверхностью заготовки, а также частично за счет стекающей охлаждающей воды.

Экранный способ охлаждения представляет систему закрытого типа. Для охлаждения заготовки в ЗВО устанавливаются водоохлаждаемые экраны, окружающие все грани заготовки. Отдельные секции экранов выполнены подобно кристаллизатору из толстостенной медной облицовки, стянутой стальным корпусом. Экраны обеспечивают мягкое и наиболее равномерное охлаждение поверхности непрерывнолитой заготовки, но при их использовании значительно снижается интенсивность теплоотвода, что приводит к углублению жидкой фазы на 10–15 % и, следовательно, к удлинению ЗВО.

Конструктивно зона вторичного охлаждения выполняется из отдельных секций, в которых можно изменять режим охлаждения. На основе большого практического опыта рекомендуется всю ЗВО разделять на три участка с разными соотношениями по расходу охлаждающей воды, % от общего расхода в ЗВО: участок 1 – (50÷60) от общего расхода воды в ЗВО; участок 2 – (25÷30); участок 3 – (15÷20).

От режимов работы ЗВО в значительной степени зависит качество получаемых непрерывнолитых заготовок (наличие внутренней осевой рыхлости, трещин и т.д.).

Конструкция ЗВО и режим работы определяются маркой стали, профилем и размерами заготовки, скоростью разливки. В зависимости от марок сталей и их физических свойств определяется способ охлаждения [1,13].

Тепловые режимы вторичного охлаждения оказывают существенное влияние на производительность МНЛЗ и качество отливаемых непрерывнолитых заготовок, а также на возникающие термические напряжения, из-за чего данный вопрос требует отдельного детального исследования.

Для уменьшения количества дефектов в непрерывнолитых заготовках необходимо анализировать условия охлаждения, принципы и методы его организации, установить основные закономерности теплопередачи в ЗВО и возможности управления тепловыми режимами охлаждения непрерывнолитых заготовок.

В пределах ЗВО необходимо осуществить отвод тепла для окончания процесса затвердевания; обеспечить необходимую интенсивность охлаждения заготовки, при которой достигается равномерное и непрерывное снижение температуры поверхности, что способствует повышению ее качества. При неправильной организации теплового режима охлаждения может происходить скачкообразное изменение температуры поверхности заготовки по его высоте и периметру, приводящее к росту термических напряжений и возможности появления трещин.

В конце ЗВО прекращается принудительное водяное охлаждение. Эта область характеризуется свободным охлаждением заготовки на воздухе. При выходе из зоны принудительного вторичного охлаждения непрерывнолитая заготовка продолжает охлаждаться за счет излучения и свободной конвекции.

Основное количества теплоты отводится от заготовки за счет излучения в окружающее пространство и лишь незначительная часть тепла передается за счет свободной конвекции, а также теплопроводностью в ролики по механизму контактного теплообмена [19,63].

Для повышения качества непрерывнолитых заготовок необходимо анализировать условия охлаждения, принципы и методы его организации, установить основные закономерности теплопередачи в ЗВО и возможности управления тепловыми режимами охлаждения непрерывнолитых заготовок.

Для вторичного охлаждения непрерывнолитой заготовки чаще всего применяются системы форсунок. В зависимости от конструкции МНЛЗ, размеров заготовок и других факторов используются форсунки различных типов, которые располагаются на стояках или поперечных трубопроводах.

Форсунки для вторичного охлаждения выполняют главную задачу - создают необходимую плотность орошения поверхности, а также обеспечивают определенную скорость движения капелек воды, равномерность охлаждения поверхности заготовки, возможность регулирования расхода воды в широких пределах [19].

В последнее время широкое применение находят широкоугольные плоскофакельные форсунки (например, щелевого типа) с углами раскрытия факела 90° и 120° , которые обеспечивают лучшее распределение воды по периметру заготовок большого диаметра. Особенно удобны подобные форсунки при установке на мощных МНЛЗ в узком межроликовом пространстве. На рисунке 3 показаны примерные схемы расположения форсунок по ширине заготовки.

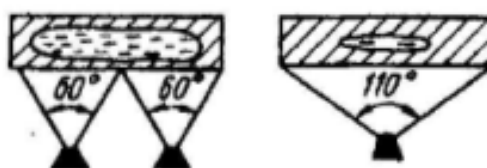


Рис. 3 – Схема расположения форсунок по ширине заготовки с разными углами раскрытия

Важнейшим параметром, определяющим режим вторичного охлаждения, является коэффициент теплоотдачи на поверхности заготовки. Для различных способов водяного охлаждения величина коэффициента теплоотдачи α составляет, Вт/(м²·К) [19]:

Струйное охлаждение	2000 ... 4000
Форсуночное жесткое	1000 ... 1500
Ролико-форсуночное (смягченное)	300 ... 500
Роликовое (мягкое)	200 ... 300
Экранное	100 ... 150

В связи с трудностями регулирования режимов водяного охлаждения при низкой интенсивности ведутся исследования по применению других способов охлаждения, анализируются возможности использования разных теплоносителей. Снижение интенсивности вторичного охлаждения позволяет выравнять график изменения температуры поверхности по длине заготовки, а также повысить значение температуры поверхности в конце ЗВО.

Основные способы охлаждения, которые применяются в настоящее время, можно разделить на следующие характерные режимы: охлаждение в пароводяной среде; в пузырьчатом слое воды; водовоздушное охлаждение; паровоздушное охлаждение; охлаждение на воздухе.

При интенсивном водяном охлаждении в пароводяной среде на поверхности заготовки скорость затвердевания несколько увеличивается, глубина жидкой фазы уменьшается. Но при этом на поверхности заготовки возникает неравномерное распределение по периметру паровых пленок, что приводит к появлению резких градиентов температур и возникновению трещин.

Режимом, получившим наиболее широкое распространение, является охлаждение в пузырьчатом слое воды, при котором одновременно с выравниванием температур происходит равномерное медленное охлаждение заготовки. Такой режим обеспечивает наилучшее качество заготовок различных профилей и марок сталей [64].

Водовоздушное охлаждение, находящее в последнее время все большее распространение, обеспечивает изменение в широких пределах $\alpha = (250 \dots 500)$ Вт/(м²·К) и выше. Охлаждающая вода распыляется струями воздуха на мельчайшие частицы. Образующееся при этом облако воздушно-водяной эмульсии переносится с большой скоростью по поверхности заготовки, что увеличивает зону охлаждения, повышает его равномерность и регулярность [19]. Более 95 % частиц воды имеют размер < 100 мкм, создается водяной туман, объем которого в сравнении с обычным водяным охлаждением имеет большую величину. Поэтому, несмотря на меньшую концентрацию воды, достигается более интенсивное охлаждение заготовки, а колебания температуры поверхности при охлаждении

водяным туманом примерно меньше в 2 раза. Более равномерное и интенсивное охлаждение обеспечивается преимущественно в результате отвода тепла на испарение более мелких капель воды. Перепады температур на поверхности заготовки вместо 200 °С не превышают 50 °С и, соответственно, снижаются величины термических напряжений, вызывающих появление трещин. Повышение скорости воздушного потока и расхода воздуха при неизменном расходе воды увеличивает теплоотвод с поверхности заготовки. Таким образом, водовоздушное охлаждение позволяет, благодаря выравниванию температур, получать заготовки с меньшими дефектами и высокой температурой поверхности в конце ЗВО.

Паровоздушное и воздушное охлаждение характеризуются низкой интенсивностью. Для газообразных охладителей $\alpha = (150 \dots 200) \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ и ниже, что приводит к разогреву поверхности заготовки и, следовательно, к появлению поверхностных дефектов.

Влияние интенсивности теплоотдачи в зоне вторичного охлаждения на качество непрерывнолитой заготовки является важным практическим вопросом. При выборе режима охлаждения необходимо в первую очередь обеспечить условие равномерного снижения температуры и затвердевания по длине заготовки. Однако при высокой интенсивности в случае струйного охлаждения из-за резкого снижения температуры поверхности образуются трещины. Недостаточная длина ЗВО или низкая интенсивность охлаждения может также привести к появлению внутренних трещин из-за давления валков на поверхность затвердевающей заготовки, а также вследствие разогрева корочки на выходе заготовки из ЗВО.

В связи с этим в процессе освоения непрерывной разливки происходит последовательное снижение интенсивности теплоотдачи в зоне вторичного охлаждения.

Значительное уменьшение удельного расхода воды и соответственно интенсивности охлаждения, в свою очередь, увеличивает глубину жидкой лунки и необходимую длину зоны вторичного охлаждения. Кроме того при низкой

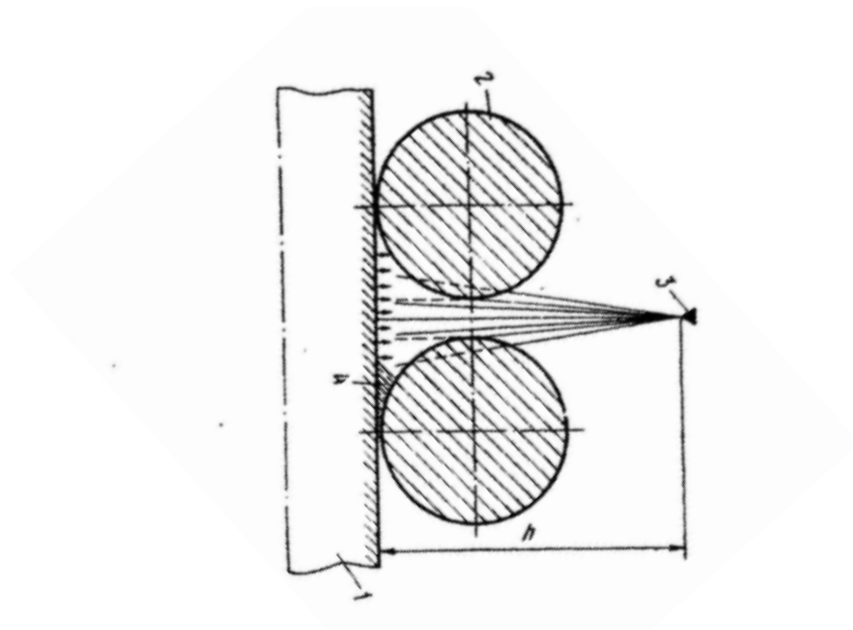
интенсивности теплоотвода при коэффициентах теплоотдачи на уровне $\alpha = 150$ Вт/(м²·К) возникает осевая рыхлость в заготовке. При повышении интенсивности охлаждения до значений $\alpha = (250 \dots 300)$ Вт/(м²·К) существенно улучшается макроструктура заготовки, уменьшается осевая рыхлость и ликвация, снижается количество трещин и других дефектов [64].

Для водяного вторичного охлаждения основное значение имеет конвективный теплообмен при обтекании поверхности заготовки водой. Согласно этому определяющими являются условия вынужденного движения пленки жидкости вдоль охлаждаемой поверхности непрерывнолитой заготовки.

Теоретическая оценка коэффициентов теплоотдачи в ЗВО усложняется такими факторами, как неоднородность поля скоростей воды в факеле форсунок, пленкой стекающей воды и др. Поэтому в большинстве случаев величины α определяют на основе экспериментальных исследований.

Передача тепла от непрерывнолитой заготовки к воде в ЗВО протекает в очень сложных условиях и зависит от режимных факторов, определяющих гидродинамическую картину на охлаждаемой поверхности, и конструктивных параметров зоны [44].

На рисунке 4 показана схема орошения заготовки при ролико-форсуночном охлаждении в пространстве между опорными роликами. Видно, что наряду с орошением поверхности заготовки измельченными каплями воды из форсунки, в зоне у нижнего ролика образуется слой воды, стекающий далее по поверхности. Между роликами выделяют несколько зон, отличающихся по механизму теплоотвода: зона орошения водой; натекания струи; участок контактного охлаждения роликом; зона свободной конвекции и излучения на воздухе.



1 – заготовка; 2 – опорные ролики; 3 – форсунка; 4 – слой воды

Рис.4 – Схема орошения заготовки

Самый большой теплоотвод осуществляется в зоне непосредственного орошения водой поверхности заготовки.

Процесс форсуночного водяного охлаждения разделяется на следующие стадии: становление процесса; стадия пленочного кипения, характеризующаяся наличием устойчивой паровой оболочки и значительным снижением коэффициента теплоотдачи; разрушение пленки (кратковременное пузырьчатое кипение); стадия конвективной теплоотдачи без кипения.

Е. Мизикаром [65] выявлены три механизма отбора тепла в зависимости от температуры охлаждаемой поверхности: при температуре ниже критической (в опыте 565 °С и выше 120 °С) водяные капли проникают через паровую пленку, образующуюся в результате сосуществования пленочного и пузырькового режимов кипения; при температуре поверхности, близкой к температуре кипения, парообразование прекращается и реализуется конвективная теплоотдача; при температуре поверхности выше критической образуется устойчивая паровая пленка, которая изолирует капли воды от поверхности.

Некоторыми зарубежными исследователями установлено, что в общем случае теплообмен в зоне орошения осуществляется путем конвективной теплоотдачи к охлаждающей воде, излучением между поверхностью заготовки и окружающими деталями агрегата, теплоотдачей на испарение и кипение охлаждающей воды, а также контактным теплообменом с опорными роликами. Как показали результаты исследований условий охлаждения в ЗВО [45], проведенных при отливке широких слябов толщиной 0,21 м, самая большая доля тепла удаляется стекающими потоками воды (39 %), излучением передается 28 %, теплопроводностью в ролики 17 %, передается струями в момент соударения с заготовкой 16 % тепла, роль же конвективного теплообмена с окружающим воздухом незначительна.

На действующих установках в ЗВО основное количество тепла отводится от заготовки охлаждающей водой и паром, получающимся при частичном испарении воды в условиях соприкосновения ее с раскаленной поверхностью заготовки. Испарение части воды приводит к интенсивной теплоотдаче от поверхности заготовки вследствие большой теплоты парообразования.

Большое влияние на ход затвердевания заготовки оказывает конструктивное оформление ЗВО и способ охлаждения непосредственно под кристаллизатором. При струйном или форсуночном охлаждении с большими удельными расходами воды часть ее проникает снизу в зазор между стенками кристаллизатора и заготовки, образовавшийся в результате усадки, что приводит к резкому повышению интенсивности теплоотвода в нижней части кристаллизатора за счет снижения термического сопротивления зазора. При ролико-форсуночном охлаждении с меньшими расходами вода не проникает в зазор, следовательно, интенсивность охлаждения в этом случае существенно ниже, что влияет на толщину корочки. Поэтому на практике в случае ролико-форсуночного охлаждения с небольшими расходами воды для предотвращения возможности прорыва предусматривают установку форсунок, направленных снизу вверх (так называемый режим охлаждения «с подбоям» снизу) [66, 67].

Стоит отметить, что в настоящее время теплообмен в зоне вторичного охлаждения изучен недостаточно. В имеющихся литературных источниках по исследованию вторичного охлаждения рекомендации по рациональным режимам охлаждения формулируются, в основном, исходя из общих условий предотвращения появления внутренних трещин. Эти режимы не учитывают локальную неравномерность отвода тепла, присущую форсуночному охлаждению. До настоящего времени недостаточно изучены особенности охлаждения поверхностного слоя непрерывнолитой заготовки. Мало данных по измерениям температурного поля, по тепловым характеристикам форсунок и т.д. Приводимые в литературе данные о взаимосвязи коэффициента теплоотдачи и плотности орошения поверхности значительно различаются, что затрудняет формулирование граничных условий при математическом моделировании процесса охлаждения заготовки. Полученные результаты исследований часто не учитывают экранирующего действия конструкции поддерживающей системы зоны вторичного охлаждения, в частности, экранирования роликами или брусками, которые могут изменить гидродинамическую картину на охлаждаемой поверхности заготовки.

1.7 Теория двухфазной зоны кристаллизационного расплава и ее приложение к затвердеванию непрерывнолитой заготовки

В кристаллизующейся заготовке переход металла из жидкого в твёрдое агрегатное состояние происходит в переходной области – двухфазной зоне, расположенной между жидкой и твёрдой частями заготовки. Эта зона представляет собой более или менее тесно переплетённую гетерогенную смесь кристаллов дендритной, игольчатой и других форм с ещё незакристаллизовавшимся расплавом. Изучение особенностей поведения и структуры двухфазной зоны имеет важное научное и практическое значение, так как именно здесь формируются свойства, связанные с физической и

химической неоднородностью, и практически предопределяются основные качественные характеристики литого металла. Поэтому последовательный и научно обоснованный поиск способов повышения качества литого металла должен базироваться на учёте роли и особенностях поведения двухфазной зоны в процессе затвердевания заготовки [68].

Описание поведения двухфазной зоны в процессе затвердевания заготовки основывается на квазистационарной теории. В рамках этой теории состояние и поведение двухфазной зоны определяется системой уравнений теплопроводности и диффузии для неоднородной среды с внутренними источниками теплоты и вещества.

По квазистационарной теории учитывается только продольный массоперенос по жидкой фракции двухфазной зоны. Условие квазиравновесия «даёт» название теории и отражает тот факт, что внутри двухфазной зоны кинетическим и диффузионным переохлаждением пренебрегают – внутри зоны жидкость находится в равновесном состоянии, т.е. считается, что в двухфазной зоне имеется равновесие между концентрациями расплава и выделяющимися из него кристаллами. Но при этом полного равновесия в системе нет, так как из-за небольшой диффузионной подвижности компонентов в твёрдом состоянии распределение вещества в твёрдой фазе остаётся неоднородным.

Многолетняя практика применения тепловой теории квазиравновесной двухфазной зоны позволяет с полным основанием утверждать, что степень адекватности теоретического расчёта теплового режима затвердевающей заготовки определяется главным образом надёжностью, с которой известны исследователю граничные условия на поверхности заготовки. Таковыми, например, могут быть заданные на поверхности заготовки зависимости от времени – температуры, теплового потока или условий теплообмена.

Двухфазная зона в реальных условиях МНЛЗ занимает значительный объём непрерывнолитой заготовки. При повышении концентрации углерода в стали температурный интервал затвердевания увеличивается, эффективная теплоёмкость уменьшается, что сопровождается заметным ростом скорости

движения изотерм, понижением градиентов температуры в сечениях заготовки и соответствующим сокращением глубины лунки для всех изотерм. В целом при увеличении концентрации углерода процесс становится более изотермичным, более «объёмным», «последовательный» характер кристаллизации явственнее выражается в сплавах с меньшей концентрацией углерода – с более узким температурным интервалом затвердевания.

С использованием положений тепловой теории двухфазной зоны могут быть исследованы весьма тонкие эффекты, связанные с кристаллизацией сплавов. Например, в работах [69, 70] было изучено проникновение тепловых колебаний в двухфазную зону кристаллизующегося сплава. Такие колебания могут вызываться случайными или технологическими причинами, а также специально создаваться для достижения определённых целей. Оказалось, что в зависимости от характеристик тепловых колебаний двухфазная зона может возвратно-поступательно перемещаться по заготовке с тем большей амплитудой, чем больше период колебаний и ширина зоны. Чем уже температурный интервал двухфазной зоны и чем выше частота колебаний, тем интенсивней они поглощаются двухфазной зоной. Как показали расчёты, тепловые колебания в зависимости от их характеристик могут достаточно разнообразно воздействовать на структуру затвердевающей заготовки. Так, например, они могут стимулировать размельчение структуры в приповерхностных областях, вызывать неоднородность в дендритно-зерённой структуре, приводить к разрушению зоны столбчатых кристаллов в срединной части заготовки, образовывать зоны обеднённые примесью – так называемому дефекту «белой полосы» и в целом могут оказывать разнообразное воздействие на служебные характеристики литого металла.

Теория квазиравновесной двухфазной зоны используется для решения ряда практических задач, в том числе при разработке и оптимизации различных технологий получения литого металла: при непрерывной разливке, ЭСП, ВДП, ЭЛП, производстве обычных, крупных и сверхкрупных заготовок и т. д. [71].

Следует отметить, что аналитические расчёты затвердевания непрерывнолитой заготовки, выполненные на основе квазиравновесной модели двухфазной зоны, дают не совсем точные результаты для процесса управления качеством получаемой заготовки. То есть уровень сегодняшних знаний о природе образования горячих трещин в заготовке не достаточен для решения этой проблемы чисто аналитическим путём.

Принимая во внимание важность процессов, протекающих в двухфазной зоне заготовки, не следует забывать и о других не менее важных факторах, оказывающих влияние на формирование свойств непрерывнолитых заготовок. Согласно мнению большинства исследователей, при одинаковых условиях теплоотвода, наибольшее влияние на качество непрерывнолитого металла оказывает его химический состав. Об основных особенностях влияния различных примесей и их концентраций на уровень поверхностных и внутренних дефектов непрерывнолитых заготовок речь пойдёт дальше.

1.8 Влияние химического состава стали на процесс затвердевания и свойства получаемого металла

Как отмечено во многих работах, [например, 1, 2, 4, 72] выделяются следующие группы элементов, которые должны при затвердевании оказывать неаддитивно заметное влияние:

- углерод – основной элемент композиции, азот, сурьма, олово, мышьяк, медь - примесные элементы, не удаляемые без применения специальных довольно сложных технологических методов;
- сера и фосфор – примесные элементы, удаляемые до заданного и желаемого уровня,
- кремний и алюминий – технологические элементы, вводимые в процессе выплавки стали.

Все эти элементы влияют на свойства стали, причём это влияние в определённой мере является общим для этих элементов: они в той или иной

степени упрочняют матрицу, снижают пластичность металла, снижают сопротивление охрупчивающим и динамическим воздействиям.

Примесные элементы даже в незначительных количествах оказывают вредное воздействие на различные свойства стали. Они влияют на такие важные свойства, как прочность (предел текучести, длительную прочность), вязкость (сопротивление хрупкому разрушению, деформируемость в горячем и холодном состояниях), поведение при фазовых превращениях, свариваемость (сопротивление распространению трещин, вязкость зоны термического влияния), коррозионную стойкость (стойкость к образованию водородных трещин, коррозионное растрескивание под напряжением).

Поведение материала определяется не средним содержанием элемента, а его распределением в нём. Характер и степень воздействия зависят от того, в каком виде и где находятся в данный момент примесные элементы.

По характеру взаимодействия с кристаллической решёткой железа они могут быть разделены на примеси внедрения (C, N) и замещения (S, P, As, Sb, Sn).

При концентрации примесей порядка 10^{-4} % [73] и гомогенном растворении их в решётке железа едва ли можно ожидать влияния на свойства стали. Действие примесей основано на сегрегации и выделении новых фаз. Существует несколько типов сегрегации, которые повышают локальную концентрацию, а именно, появляющееся при затвердевании зональная ликвация в заготовке и дендритная ликвация, а также сегрегации по границам зёрен, наблюдающиеся преимущественно после термообработки.

В процессе затвердевания и фазовых превращений эти элементы выделяются в виде избыточной фазы (карбиды, нитриды, сульфидные, оксидные или окисульфидные включения, эвтектики) или в виде ликвационных зон в первичной кристаллической структуре или сегрегации по дефектам кристаллической решётки (дислокациям, границам зёрен и др).

Имеются отдельные данные об усиливающем влиянии кремния на дендритную ликвацию примесных элементов, и, прежде всего, серы и фосфора [61,62].

Можно констатировать, что по наблюдениям многих авторов [74], примесные элементы кремний и алюминий оказывают значительное влияние на сегрегационные явления и первичную кристаллическую структуру. Однако причины этого явления не выявлены, а объяснения противоречивы.

Обращает на себя внимание и тот факт, что в одних случаях действие этих элементов проявляется, а в ряде – не наблюдается.

Поскольку свойства материала определяются в изделиях подвергнутых пластической деформации и прошедших термическую обработку, то большая часть исследований по влиянию примесных и легирующих элементов на свойства посвящена их поведению в твёрдом металле. При этом следует ожидать типовых проявлений влияния выделенной группы, в определённой степени связанных с их воздействием на характеристики литого металла.

Известно, что присутствие в стали вредных примесей, ряда цветных металлов, газов (таких как фосфор, сурьма, олово, мышьяк, медь, азот и др.) способствует развитию отпускной хрупкости, проявляющейся в снижении ударной вязкости, повышении температуры хрупко-вязкого перехода, увеличении доли межзёрненного разрушения в изломе.

Основной причиной развития отпускной хрупкости в сталях считается сегрегация примесей по границам зёрен, приводящая к интеркристаллитному разрушению вследствие межзёрненной когезии. Однако, при этом следует обратить внимание на то, что при относительно низком содержании примесных элементов, например, фосфора ниже 0,005%, охрупчивающего влияния не наблюдали.

Также многие исследователи отмечают взаимодействие между охрупчивающим влиянием кремния и фосфора, марганца и фосфора.

Имеются сведения о том, что помимо фосфора, сурьмы, олова, мышьяка, а также кремния и марганца, присутствующих в конструкционных сталях,

усиливать склонность к отпускной хрупкости при определённых условиях могут медь и азот, то есть элементы совершенно различно, с позиций теории легирования, ведущие себя в сплавах с железом. [64, 65]. Считается, что медь лишь усиливает охрупчивающее действие других примесей и в их отсутствие не приводит к развитию обратимой отпускной хрупкости.

Что касается условий, в которых происходит сегрегация примесей, то в этом вопросе нет однозначного мнения. Многие исследователи считают, что интеркристаллитное разрушение происходит главным образом по границам исходных аустенитных зёрен, то есть сегрегации примесей на границах формируются в аустенитном состоянии и фиксируются закалкой [75].

Таким образом, для многочисленных и глубоких исследований влияния химического состава на свойства стали можно констатировать:

- только единичные работы пытаются проанализировать влияние примесных элементов на характеристики литой структуры, и практически нет работ, посвящённых их влиянию собственно на процесс затвердевания;
- установлено, что существует ряд элементов (Si, As, Sb, Ge, P, B, C, S), которые вносят искажение в формирование первичной кристаллической структуры, что приводит к образованию дефектов микро и макроуровня;
- все рассматриваемые элементы C, N, Mn, S, P, Sb, As, Cu, Si, Al, независимо от того относятся они к элементам внедрения или замещения, упрочняют матрицу, снижают пластичность и сопротивление металла охрупчивающим и динамическим воздействиям;
- влияние анализируемых примесных элементов связано с воздействием на процессы массопереноса, сегрегации и, вероятно, распределения при затвердевании и в литом металле.

1.9 Выводы

Исходя из проведённого анализа литературных источников можно сделать следующие выводы.

1. Сложная взаимосвязь явлений и многообразие факторов, влияющих на процесс формирования непрерывнолитой заготовки, ставят исследование теплопереноса при непрерывной разливке в ряд важнейших и актуальных задач.

2. Обеспечение максимальной скорости затвердевания заготовок связано с анализом термических напряжений, которые не должны превышать допустимых пределов. Однако комплексное решение задачи о напряженном состоянии затвердевающей непрерывнолитой заготовки с одновременным учетом усадочных, термических и механических напряжений связано со значительными трудностями.

3. Недостаточно изучены вопросы влияния температурных полей на возникающие термические напряжения в заготовке как по ее длине, так и по периметру.

4. Опыт эксплуатации промышленных машин непрерывного литья заготовок показал, что дальнейшее совершенствование их конструкций, технологии и возможности получения качественных заготовок в значительной мере зависит от возможностей управления процессами теплопередачи и затвердевания непрерывнолитых заготовок.

5. Процессы теплообмена решающим образом влияют на образующуюся внутреннюю структуру металла в зоне вторичного охлаждения.

6. Для разработки рациональных режимов охлаждения необходимо исследовать влияние неоднородности граничных условий по длине и периметру затвердевающего металла на качество получаемой непрерывнолитой заготовки.

7. Необходимо разработать математическую модель процесса охлаждения непрерывнолитой заготовки с учётом выделения теплоты кристаллизации в развитой двухфазной зоне, учитывающую влияние неоднородности граничных условий на формирование температурных полей и перетоки теплоты внутри заготовки.

ГЛАВА 2. ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ОХЛАЖДАЕМЫХ ЗАГОТОВОК КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ В УСТАНОВКАХ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ

2.1 Описание машины непрерывного литья заготовок и технологии процесса разливки

Схема вертикальной МНЛЗ представлена на рисунке 5.

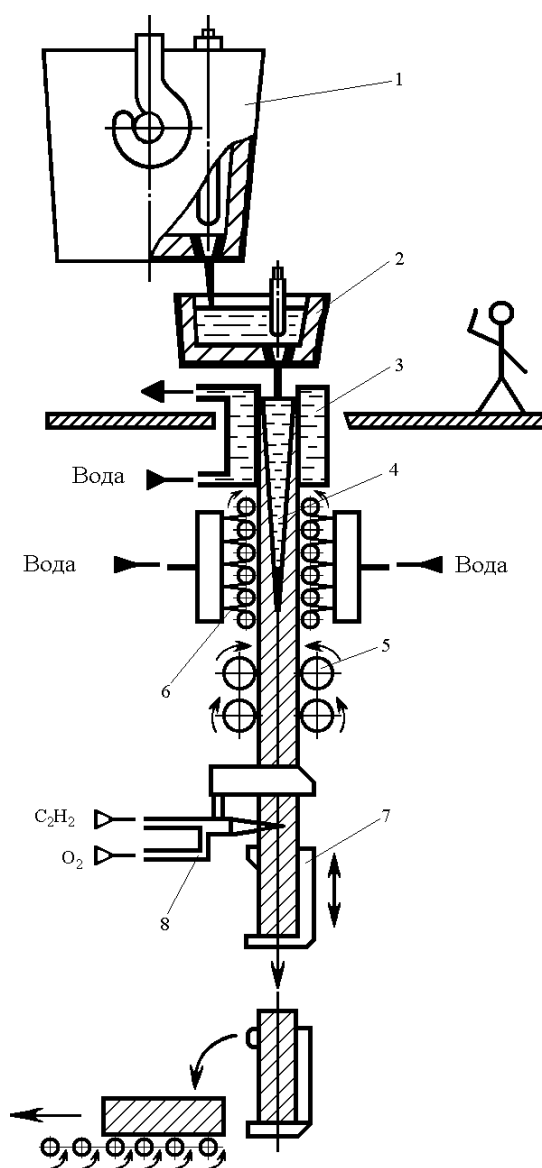


Рис. 5 – Схема МНЛЗ

Сталеразливочный или основной ковш – в нем находится весь разливаемый металл. Если в цехе стоит несколько машин непрерывного литья заготовок, то, как правило, данный ковш обеспечивает жидким металлом все установки.

Промежуточный ковш – принимает разливаемый металл на МНЛЗ, из которого он поступает в кристаллизатор.

Кристаллизатор – выполняет функцию первичного теплоотвода и формообразователя. В нем обеспечивается требуемая форма заготовки. Кристаллизаторы делают водоохлаждаемыми с медными стенками для обеспечения высокого теплоотвода от поверхности затвердевающего металла.

Опорные ролики - используются при непрерывной разливке для фиксации затвердевающей корочки отливаемых заготовок.

Механизм вытягивания заготовок представляет собой один общий поддон, на котором расположены головки затравок. Поддон приводится в движение с помощью тросового механизма вытягивания отливаемых заготовок.

Зона вторичного охлаждения заготовок – обеспечивает полное затвердевание заготовки. Вторичное охлаждение отливаемых заготовок производится с помощью водяных или водо-воздушных форсунок, расположенных по прямоугольному или кольцевому контуру [76].

Кантовочная рама предназначена для фиксации отливаемых заготовок и их выгрузки из машины на рольганг.

Гидравлический нож предназначен для отделения затвердевшего металла, который после обрезки становится готовой заготовкой.

Рольганг выгрузки предназначен для выгрузки готовых заготовок.

В общем виде процесс непрерывной разливки стали выглядит следующим образом.

Сталеразливочный ковш поднимают разливочным краном на поворотный стенд МНЛЗ, который поворачивают на 180° в положение разливки. Затем открывается шиберный затвор и металл начинает поступать в предварительно

разогретый промежуточный ковш (на разливочной площадке, как правило, расположены две станции разогрева промковшей для сокращения времени на переподготовку машины между сериями плавов). Промковш наполняется до определённого уровня, после чего металл, через дозирующие устройства в днище промковша начинает поступать в водоохлаждаемые кристаллизаторы [77].

Перед началом заливки в кристаллизатор вводится специальное устройство с замковым захватом («затравка»), как дно для первой порции металла. После затвердевания металла затравка вытягивается из кристаллизатора, увлекая за собой формирующуюся заготовку. Поступление жидкого металла продолжается, и заготовка непрерывно наращивается. В кристаллизаторе затвердевают лишь поверхностные слои металла, образуя твёрдую оболочку заготовки, сохраняющей жидкую фазу по центральной оси. Поэтому за кристаллизатором располагают зону вторичного охлаждения (ЗВО), называемую также второй зоной кристаллизации. В этой зоне в результате форсированного поверхностного охлаждения заготовка затвердевает по всему сечению. Далее заготовка с помощью тянущих валков продвигается дальше, где от нее отделяется затравка, и затем разрезается на мерные длины на установке газовой резки. Затем, в зависимости от конструкции МНЛЗ, заготовка поступает либо на холодильник с шагающими балками, либо сразу на прокатный стан.

Стоит отметить, что во время кристаллизации формирующаяся заготовка металла постоянно перемещается вверх-вниз относительно кристаллизатора посредством небольших цилиндров, расположенных в ручье. Это позволяет уменьшить количество трещин - дефектов. Вокруг каждого ручья создаётся сильное электромагнитное поле, которое позволяет формировать надлежащую кристаллическую структуру заготовки.

2.2 Постановка задачи

Одна из основных проблем повышения качества непрерывнолитой заготовки заключается в устранении или уменьшении различного рода трещин. Причиной возникновения и развития трещин являются напряжения в формирующейся непрерывнолитой заготовке, превышающие предел прочности металла.

Появление этих напряжений в основном связано с характером изменяющегося во времени температурного поля оболочки заготовки.

В то же время рациональное распределение интенсивности теплоотвода по периметру и длине заготовки должно обеспечить отсутствие опасных напряжений, которые могли бы привести к появлению трещин.

Стоит отметить, что непрерывная разливка стали является важной областью современной металлургической промышленности и используется для производства стальных заготовок различного профиля сечения. В мире действует более 2000 машин непрерывного литья заготовок, что позволяет разливать более 90% всей стали в мире на МНЛЗ. Но вопросы уменьшения поражённости дефектами получаемых цилиндрических непрерывнолитых заготовок остаются по-прежнему актуальными. Поэтому совершенствование технологии непрерывной разливки и оборудования МНЛЗ являются одними из важнейших задач. Поиск новых рациональных режимов охлаждения на основе исследования теплового состояния непрерывнолитой заготовки позволит уменьшить вероятность появления наружных и внутренних дефектов заготовок, получаемых методом непрерывной разливки.

В данной научной работе были проведены серии исследований, основанные на методах математического моделирования процесса охлаждения цилиндрической заготовки при непрерывной разливке различных марок сталей с целью поиска рациональных режимов охлаждения заготовок круглого поперечного сечения, которые позволят избежать образования различных дефектов в них. Основные исследования и поиск рациональных режимов

проводились для зоны вторичного охлаждения, так как эта область является одним из важнейших технологических узлов любой МНЛЗ и особенности затвердевания в ней на сегодняшний день изучены недостаточно.

Результаты диссертационной работы могут быть внедрены в производство, как рекомендации по выбору наиболее рациональной технологии разливки непрерывнолитых заготовок, позволяющей существенно уменьшить внутренние и внешние дефекты разливаемых заготовок. Экономический эффект при этом заключается в снижении брака при производстве, удешевлении процесса производства за счет снижения материалоемкости, трудоемкости и энергоемкости в процессе разливки непрерывнолитой заготовки. Кроме того, результаты исследований, проведённых в данной работе, можно распространить на заготовки как круглого, так и квадратного и прямоугольного сечений.

2.3 Цели и задачи исследования

В ходе исследований преследовалась следующая цель: разработка рациональных режимов охлаждения в МНЛЗ на основе исследования тепловых состояний непрерывнолитой заготовки

Необходимо отметить, что достижение поставленной цели было невозможно без решения следующих задач:

- анализ состояния, основных проблем и перспектив развития непрерывнолитой разливки заготовок круглого сечения;
- изучение современных режимов охлаждения заготовок круглого сечения при непрерывной разливке;
- разработка математической модели охлаждения заготовок круглого сечения при непрерывной разливке с учётом внутренних источников теплоты и развитой двухфазной зоны;
- исследование влияния режимов охлаждения на величины термических напряжений, возникающих при затвердевании стальных заготовок

- разработка рекомендаций по организации рациональных режимов для получения высококачественных заготовок круглого сечения из различных марок сталей.

2.4 Разработка математической модели процесса охлаждения при непрерывной разливке заготовок круглого сечения

На современном уровне теоретический анализ проблем, возникающих при непрерывной разливке, немислим без применения математического моделирования процесса и охлаждения заготовок. Практическая задача определения динамики затвердевания расплава, включающая определение температурного поля, толщины затвердевшей корочки и скорости продвижения фронта затвердевания, времени полного затвердевания и глубины жидкой фазы, может быть решена методом математического моделирования с достаточной для практических целей точностью. Определение этих параметров позволяет проанализировать сложные явления, сопровождающие процесс формирования кристаллической структуры непрерывнолитой заготовки.

Для описания процесса охлаждения за основу принимается дифференциальное уравнение энергии с внутренними источниками теплоты, особенностью которого является учёт выделения теплоты кристаллизации. В общем виде уравнение энергии при наличии внутренних источников теплоты записывается в виде [1,78]:

$$\rho \cdot \left(\frac{dh}{dt} \right) = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}T) + q_v, \quad (5)$$

где $\frac{dh}{dt}$ – полная (субстанциальная) производная энтальпии по времени,

Дж/(кг·с);

q_v – плотность внутренних источников теплоты, Вт/м³;

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

T – температура, К,

ρ - плотность металла, кг/м³

Представленное дифференциальное уравнение энергии (5) учитывает кристаллизацию непрерывнолитой заготовки как результат одновременного протекания тепловых, диффузионных и гидродинамических явлений. В строгой постановке оно должно быть дополнено дифференциальным уравнением диффузии. Однако реализация такой модели встречает серьёзные трудности, поэтому в инженерной практике вводятся упрощения для достижения главной цели – исследования тепловых режимов формирования бездефектной непрерывнолитой заготовки. Из проведённого аналитического обзора следует вывод, что гидродинамика расплава оказывает существенное влияние на ход процесса кристаллизации, но её учёт встречает значительные трудности и при этом, экспериментальных данных по распределению скоростей совершенно недостаточно.

Формирование заготовки обусловлено совместным протеканием процессов затвердевания и кристаллизации. Однако определяющим является процесс затвердевания, обусловленный процессом теплопереноса в условиях фазового превращения. Процесс кристаллизации связан с процессом теплоотвода и переохлаждения и обуславливает ту или иную структуру твёрдой среды.

В данной работе процесс формирования заготовки исследуется в приближении модели затвердевания заготовки, при этом физико-химический процесс кристаллизации из рассмотрения исключается.

Согласно принятой гипотезе, тепловые условия в заготовке являются определяющим фактором, влияющим на показатели качества заготовки. Это позволяет на основе информации о температурных полях заготовки в различные периоды процесса затвердевания прогнозировать данные показатели, а также целенаправленно управлять ими в модели.

В соответствии с принятой моделью охлаждения и затвердения заготовки решается уравнение теплопроводности:

$$C(T) \cdot \rho(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda(T) \cdot \operatorname{grad} T) + q_v. \quad (6)$$

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.

Согласно модели охлаждения, в заготовке выделяются три области: твёрдая фаза, жидкая фаза и зона двухфазного состояния.

В твёрдой фазе зависимости от температуры λ и C учитываются по эмпирическим данным.

В жидкой фазе наряду с переносом теплоты теплопроводностью происходит конвективная теплопередача. Её характер в значительной мере зависит от способа подвода жидкого металла в кристаллизатор, а интенсивность при прочих равных условиях возрастает с увеличением объёма жидкометаллической лунки, при наличии электромагнитного перемешивания и т.д. Для учёта конвективного теплопереноса вводится понятие эквивалентного коэффициента теплопроводности $\lambda_{\text{ж}}$ в жидкой среде, который определяется из эмпирических данных.

Для анализа кинетики развития двухфазного состояния разработано множество теоретических моделей различной сложности [77, 78]. Как известно, тепловыделение происходит в основном в области двухфазного состояния. В предлагаемой математической модели процесса охлаждения непрерывнолитой заготовки 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 $\bar{C}$, учитывающей выделение скрытой теплоты кристаллизации [27], которая представляет собой теплоёмкость двухфазной области.

В общем виде эффективная теплоёмкость записывается следующим образом:

$$\bar{C}(T) = \begin{cases} C_{ж}, & \text{при } T > T_l \\ C(T) - q_{кр} \cdot \left(\frac{\partial \psi}{\partial T} \right), & \text{при } T_c < T < T_l, \text{ где } \psi = \frac{T_l - T}{T_l - T_c} \\ C_T, & \text{при } T < T_c \end{cases} \quad (7)$$

где $C_{ж}$ – удельная теплоёмкость жидкой фазе, Дж/(кг·К);

C_T – удельная теплоёмкость твёрдой фазе, Дж/(кг·К);

T_l – температура ликвидус для данной марки стали, К;

T_c – температура солидус для данной марки стали, К;

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

Важным фактором, влияющим на возникающие температурные поля в затвердевающей заготовке, является характеристика её формы. Разработанная в работе математическая модель охлаждения непрерывнолитой заготовки позволяет проводить исследование процесса охлаждения заготовок двух простых профилей: цилиндрического и прямоугольного. В данной модели предполагается симметрия распределения температурного поля относительно центральной оси заготовки. Для цилиндрических (круглых) сортов заготовок осевая симметрия обусловлена их формой, поэтому возникает одномерная сугубо нелинейная задача теплопроводности [36].

Нелинейное дифференциальное уравнение теплопроводности в цилиндрических координатах выглядит так [36]:

$$C \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\lambda(T)}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \lambda(T) \cdot \left(\frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \quad (8)$$

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

r – текущий радиус заготовки, м;

ρ – плотность затвердевшего металла, кг/м³;

t – время процесса затвердевания, с;

T – температура твёрдой фазы, К;

φ – угловая координата, рад.

Граничные условия записываются следующим образом.

На границе расплав – корочка затвердевшего металла [31,32]:

$$T(r, t)_{rl} = T_l \quad (9)$$

где T_l – температура плавления металла, К;

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

Уравнение теплового баланса на поверхности заготовки:

$$-\lambda(T, r) \cdot \left(\frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \right)_{r=R} = q^0(t), \quad (10)$$

где $q^0(t)$ – плотность теплового потока на поверхности затвердевшей корочки металла, Вт/м².

Плотность отводимого в окружающее пространство теплового потока от внешней поверхности заготовки рассчитывается по формуле (10):

$$q^0(t) = \alpha \cdot (T(R, t) - T_{\text{охл}}) + \sigma_0 \cdot \varepsilon_{\text{пр}} \cdot (T^4(R, t) - T_0^4), \quad (11)$$

где $T(R, t)$ – температура наружной поверхности затвердевшей корочки, К;

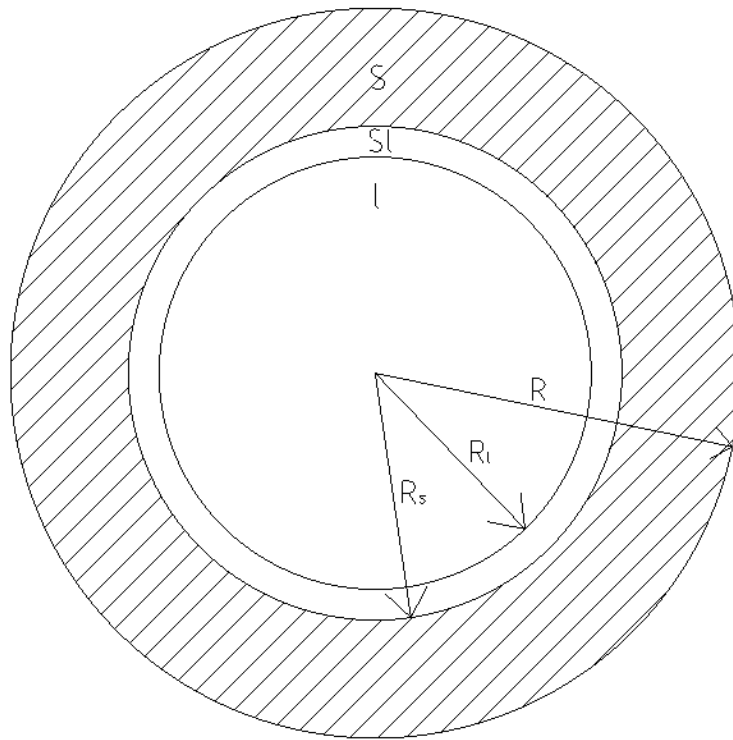
$\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведённая степень черноты,

$T_{\text{охл}}$ – температура охлаждающей среды, К;

T_0 – температура окружающей среды, К,

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана, равная $5,67 \cdot 10^{-8}$, Вт/(м²·К⁴)



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. 6 – Поперечное сечение непрерывнолитой заготовки в процессе затвердевания

Приведенная степень черноты для системы поверхность затвердевающего металла-стенка кристаллизатора считается по формуле:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{me}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{stk}}} - 1} \quad (12)$$

где $\varepsilon_{\text{me}} = 0,8$ – степень черноты поверхности затвердевающей заготовки в кристаллизаторе,

$\varepsilon_{\text{stk}} = 0,7$ – степень черноты внутренней поверхности кристаллизатора.

Приведенная степень черноты для системы поверхность затвердевающего металла-воздух в зоне вторичного охлаждения принимается равной степени черноты поверхности заготовки: $\varepsilon_{\text{пр}} = \varepsilon_{\text{ме}} = 0,7$.

Преобразуем уравнение (8), разделив на $\lambda(T)$ левую и правую части уравнения (6), к виду (13):

$$\frac{1}{a(T)} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\lambda'}{\lambda(T)} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)^2 + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (13)$$

где λ' – производная от коэффициента теплопроводности по температуре, Вт/(м·К²);

a – коэффициент температуропроводности затвердевшего металла, м²/с;

r – текущий радиус заготовки, м;

x – продольная координата по длине заготовки, м.

Конечно-разностная аппроксимация уравнения (13) для внутренних узлов по схеме Кранка-Николсона имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{1}{a(T_j^n)} \cdot \frac{T_j^{n+1} - T_j^n}{\Delta t} = & \frac{1}{2} \cdot \frac{(T_{j+1}^{n+1} - 2 \cdot T_j^{n+1} + T_{j-1}^{n+1}) + (T_{j+1}^n - 2 \cdot T_j^n + T_{j-1}^n)}{\Delta r^2} + \frac{T_{j+1}^n - T_{j-1}^n}{2 \cdot j \cdot \Delta r^2} + \\ & + \frac{\lambda'(T_j^n)}{\lambda(T_j^n)} \cdot \frac{(T_{j+1}^n - T_{j-1}^n)^2}{4 \cdot \Delta r^2}. \end{aligned} \quad (14)$$

Обозначим сеточный критерий Фурье f , а безразмерный коэффициент теплопроводности - l . Для их расчёта используются формулы (15) и (16) [25,33]:

$$f_j^n = \frac{a(T_j^n) \cdot \Delta t}{2 \cdot \Delta r^2}, \quad (15)$$

$$l_j^n = \frac{\lambda'(T_j^n) \cdot T_j^n}{2 \cdot \lambda(T_j^n)}. \quad (16)$$

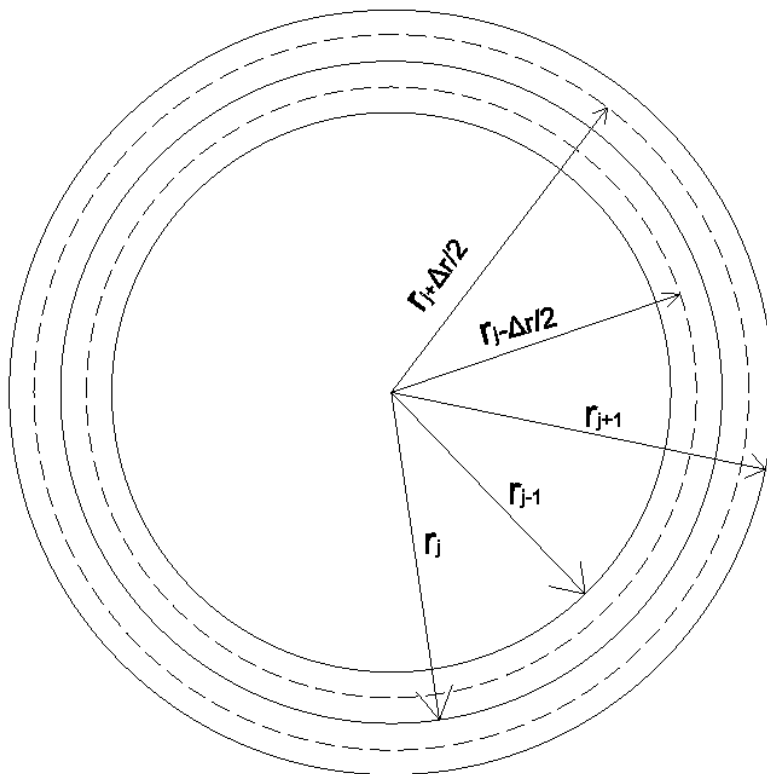


Рис. 7 – Обозначения узлов расчётной сетки в затвердевающей заготовке

Введём геометрические параметры:

- R – радиус отливаемой цилиндрической заготовки, м;
- Δr – шаг разбиения по радиусу, м;
- r_j – радиус j -ого внутреннего узла, м;
- R_j – безразмерный радиус j -ого слоя, м.

Радиус j -ого внутреннего узла и безразмерный радиус вычисляются по формулам (17) и (18):

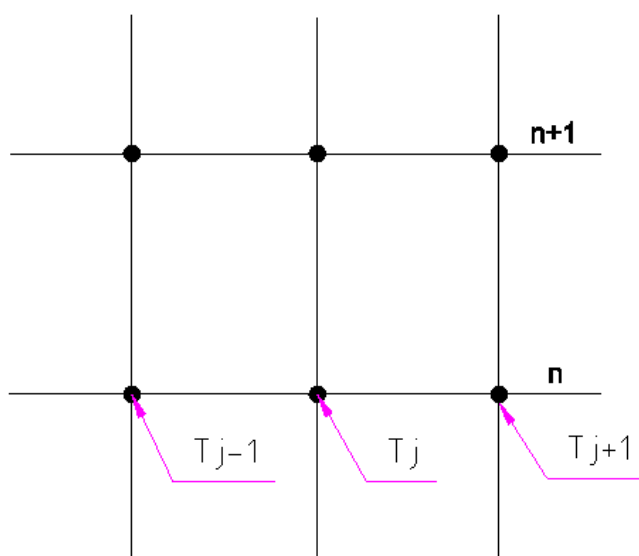
$$r_j = R - (j - 1) \cdot \Delta r, \quad (17)$$

$$R_j = \frac{r_j}{\Delta r}. \quad (18)$$

Число слоёв расчётной сетки определяется по формуле (19):

$$K = \frac{R}{\Delta r}. \quad (19)$$

Для решения уравнения (14) используется метод прогонки по неявной шеститочечной разностной схеме [79, 80].



$j-1$ – крайний левый расчетный узел, j – средний узел, $j+1$ – крайний правый расчетный узел, n , $n+1$ – момент времени расчета

Рис. 8 – Схема расчетной сетки с узлами

Температуры в узлах рассчитываются по формулам (20) и (21) [27]:

$$T_{j-1}^{n+1} = A_{j-1} \cdot (B_{j-1} + T_j^{n+1}). \quad (20)$$

$$T_j^{n+1} = A_j \cdot (B_j + T_{j+1}^n). \quad (21)$$

Введём следующие обозначения:

$$\nu_j^n = \frac{1+2 \cdot f_j^n}{f_j^n}; \omega_j^n = \frac{1-2 \cdot f_j^n}{f_j^n}; \rho_j^n = 1 + l_j^n + \frac{1}{R_j}. \quad (22)$$

Подставляя (20) и (21) в уравнение (14), после преобразований получим:

$$T_j^{n+1} = \left(\frac{1}{f_j^n} - 2 \right) \cdot T_j^n + 2 \cdot T_{j+1}^n + l_j^n \cdot (T_{j+1}^n - T_{j-1}^n)^2 + A_{j-1}^{n+1} \cdot B_{j-1}^{n+1} + T_{j+1}^{n+1}. \quad (24)$$

Решая уравнения (20), (21) и (24), получаем значения коэффициентов прогонки для внутренних узлов расчётной сетки:

$$A_j^{n+1} = \frac{1}{2 + \frac{1}{f_j^n} - A_{j-1}^{n+1}}. \quad (25)$$

$$B_j^{n+1} = \frac{1}{f_j^n - 2} \cdot T_j^n + 2 \cdot T_{j+1}^n + l_j^n \cdot (T_{j+1}^n - T_{j-1}^n)^2 + A_{j-1}^{n+1} \cdot B_{j-1}^{n+1}. \quad (26)$$

Согласно балансу теплоотвода по правому граничному узлу, получается уравнение:

$$T_1^{n+1} = A_1 \cdot (B_1 + T_2^{n+1}). \quad (27)$$

$$A_1 = \frac{1}{Z_1^n + B_{i1}^n + 1}. \quad (28)$$

$$B_1 = B_1^n \cdot T_{\text{охл}} + q_{\text{изл}}^n \cdot \frac{\Delta r}{\lambda_1^n} + Z_1^n \cdot T_1^n \quad (29)$$

$$\text{где } q_{\text{изл}}^n = \varepsilon^{\text{пр}} \cdot \sigma_0 \cdot (T_0^4 - T_1^4), \text{ Вт/м}^2; \quad (30)$$

$$Z_1^n = \frac{\rho \cdot C_1^n \cdot (r_1^2 - r_2^2) \cdot \Delta r}{2 \cdot r_1 \cdot \lambda_1^n \cdot \Delta t}; \quad (31)$$

$$B_{il}^n = \frac{\alpha \cdot \Delta r}{\lambda_1 \cdot n}. \quad (32)$$

При известных коэффициентах A_1 , B_1 последовательно рассчитываются коэффициенты A_j^{n+1} и B_j^{n+1} во всех узлах сетки. Затем по формуле (24) определяют все температуры в сеточной области, начиная от температуры жидкого металла.

Разработанная математическая модель обладает высокой сходимостью, устойчивостью, и, как следствие, позволяет проводить исследования с требуемой точностью. Это особенно важно, так как расчётный шаг по радиусу и времени брался очень малым: 0,5 мм и 0,25 секунды соответственно. Делается это для того, чтобы получить комплексную всеобъемлющую картину изменения теплофизических параметров при затвердевании заготовки и не допустить каких-либо нестыковок в расчётах [80]. Модель является имитационной, то есть позволяет моделировать погрешность вычислений внутри самой себя. В дальнейшем все исследования процесса охлаждения круглой непрерывнолитой заготовки в данной работе проводятся на основе именно этой модели.

Важной отличительной особенностью модели является учёт доли твёрдой и жидкой фазы в двухфазной области, что позволяет учесть внутренние источники теплоты через изменение теплоёмкости в двухфазной зоне. Для этого вводится понятие эффективной теплоёмкости, учитывающей выделение скрытой теплоты кристаллизации. Затем задача решается методом конечных разностей с аппроксимацией по неявной разностной схеме Кранка-Николсона, что также позволяет получить более точные решения при малых шагах по времени. Кроме того, в модели учитывается зависимость теплопроводности от температуры и радиальной координаты, что позволяет получить более точные данные изменения температуры в затвердевающей заготовке.

2.5 Исходные данные для исследования теплового состояния непрерывнолитых заготовок

Исследования процесса охлаждения непрерывнолитой заготовки проводились в условиях ОАО «МЗ «Электросталь» для заготовок из коррозионностойких марок сталей диаметром 250 мм. Данное предприятие было выбрано, так как на нем имеется несколько машин полунепрерывного литья заготовок разного диаметра (138 мм, 190 мм и 250 мм), что позволяет провести всесторонние исследования процесса охлаждения круглых непрерывнолитых заготовок.

План размещения МНЛЗ в СПЦ-4 на заводе в Электростали представлен на рисунке.



Рис. 9 – План размещения МНЛЗ

Состав отделения непрерывной разливки: 2 установки машины непрерывного литья заготовок вертикального типа с заглублением на 1/2 высоты.

Количество ручьев и сечение кристаллизаторов: машина №1 – 3 с диаметром 190 мм; машина №2 – 1 с диаметром 138 мм и 2 с диаметром 250 мм.

Сортамент: углеродистые, конструкционные, нержавеющие, инструментальные, быстрорежущие, жаропрочные стали и сплавы.

Техническая характеристика МНЛЗ №2 представлена в таблице 2.

Таблица 2 – Техническая характеристика МНЛЗ

Тип - вертикальная непрерывная с независимыми ручьями	
1	2
Количество ручьев	2
Расстояние между ручьями, мм	900
Сечения отливаемых заготовок, мм:	Ø250
Длина заготовки, мм	8500 max
Масса металла в сталеразливочном ковше, т	~ 6
Масса металла в промежуточном ковше, т	~ 4
Скорость разливки, м/мин -сечения Ø250мм -сечения Ø360мм	0,6...0,7 0,45...0,5
Длина кристаллизатора, мм	800
Амплитуда качания кристаллизатора, мм	±2...5
Частота качания кристаллизатора, мин ⁻¹	50-250
Скорость перемещения тянущей каретки, м/мин	0,3...2,4
Ход перемещения тянущей каретки, м	11,9
Скорость перемещения каретки ЭМП, м/мин	0,3...2,4
Ход перемещения каретки ЭМП, м	11,3
Технологическая длина, м	~11,8
Время разливки заготовки диаметром 250 мм, мин	11.2
Толщина корочки, образующейся за время разливки, мм	174
Толщина слоя жидкого металла, мм	76
Время полного затвердевания заготовки, мин	23

Сортамент сталей, разливаемых на МНЛЗ, представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Сортамент сталей, разливаемых на МНЛЗ

Типы сталей	Марки сталей
Инструментальные	ЭП-379, X12Ф1, X12ВМФ, 9ХС, ХВГ, Р6М5, Р9, Р18
Конструкционные	15Х, 40Х, 30ХГСА, 50ХФА, 08ХН3А
Углеродистые	ст.20, ст.45, У7, У13А
Нержавеющие (Cr-Ni)	ЭП-713, ЭП310, ЭП-410У, 12Х18Н10Т, 04Х1ЭН9, X20Н4С7
Нержавеющие Сварочные	ЭИ-395, ЭИ-898, 07Х19Н10Б, 04Х19Н9С2, 07Х25Н13, 04Х19Н11М3
Нержавеющие (Cr)	12Х13, 40Х13, 95Х18, 65Х13
Прочие (особые)	ХН73М5ТЮ, ХН35ВТЮ, 03Х11Н10М2Т, 15Х16К5Н2МВФАБ

2.6 Выводы

1. Сформулированы основные цели, задачи и методика исследования.
2. Показано, что решение задач затвердевания и охлаждения непрерывнолитых заготовок требует комплексного всестороннего подхода и разработки соответствующей математической модели.
3. Разработана математическая модель процесса охлаждения при непрерывном литье заготовок круглого сечения, учитывающая выделение теплоты кристаллизации в двухфазной области путём присвоения численных

значений теплофизическим параметрам с учётом зависимости относительной объёмной доли жидкой и твёрдой фазы от температуры.

4. Разработанная модель обладает высокой сходимостью и устойчивостью, чем обеспечивается высокая точность проводимых исследований.

5. Разработанная модель учитывает зависимость теплопроводности как от температуры, так и по радиальной координате, что позволяет получить более точную картину изменения температурных полей в затвердевающей заготовке.

6. Разработанная модель позволяет исследовать процесс охлаждения в заготовках различных форм поперечного сечения: прямоугольного и круглого.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ЗАТВЕРДЕВАНИИ В ПРОЦЕССЕ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ ЗАГОТОВОК КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ ИЗ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ МАРОК СТАЛЕЙ В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ И ЗОНЕ ВТОРИЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ (ЗВО)

3.1. Исследование теплового состояния затвердевающей заготовки в кристаллизаторе, расчёт скорости затвердевания и температурных полей затвердевшей корочки металла в различных условиях работы кристаллизатора

Для получения высококачественных заготовок, уменьшения овальности профиля поперечного сечения, наружных и внутренних трещин и других дефектов необходимо провести всесторонние исследования влияния теплотехнических параметров на процесс формирования и охлаждения непрерывнолитых заготовок.

Эффективным методом для решения задач затвердевания непрерывнолитых заготовок является математическое моделирование с использованием компьютера. В данной работе используется этот метод для выявления наиболее рационального режима разлива в кристаллизаторе и ЗВО.

Для анализа процесса затвердевания в кристаллизаторе исследовали рост толщины корочки во времени. Особое внимание уделялось обеспечению необходимой толщины корочки на выходе из кристаллизатора, которая должна быть $> (20 - 25)$ мм, чтобы обеспечить достаточную механическую прочность вытягиваемой заготовки и исключить возможность прорыва жидкого металла. Прочность такой корочки достаточна, чтобы противостоять силам трения и действию ферростатического давления, которые неизбежно возникают при разливе и могут привести к овальности профиля поперечного сечения и возникновению различного рода трещин.

Также проводились исследования изменения температуры поверхности

заготовки во времени. Как показывают результаты многочисленных исследований [81, 82, 83], причиной появления и развития наружных продольных и радиальных трещин может быть изменяющееся во времени температурное поле оболочки заготовки, вызывающее значительные температурные напряжения. Наиболее полно механизм трещинообразования отражает теория [77], по которой появление трещин в непрерывнолитой заготовке связывается с напряженно-деформированным состоянием в ее затвердевшей части, распределением температур и механическими свойствами в широком интервале температур. Опытами установлено, что практически невозможен режим охлаждения, при котором отсутствовали бы термические напряжения, возникающие в кристаллизаторе. На практике идёт речь о минимальных величинах напряжений, не превышающих допустимых пределов. При неправильной организации тепловых режимов охлаждения происходят значительные перепады температуры поверхности заготовки по высоте и периметру, приводящие к возрастанию напряжений и нарушению сплошности металла.

На основе обобщения описанных ранее экспериментальных данных в расчетах принята следующая модель зазора между стенкой кристаллизатора и затвердевающим металлом: сначала идет зона плотного контакта заготовки со стенкой кристаллизатора, и зазора нет, затем образуется зазор, и его толщина изменяется в пределах (0,5...2,5) мм по длине кристаллизатора. То есть по длине кристаллизатора корочка затвердевающего металла постепенно всё дальше отходит от поверхности гильзы, образуя всё больший зазор между стенкой кристаллизатора и затвердевающим металлом.

Как уже было показано ранее, нелинейное дифференциальное уравнение теплопроводности в цилиндрических координатах с учётом осевой симметрии круглых сортовых заготовок выглядит так:

$$C \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\lambda(T)}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \lambda(T) \cdot \left(\frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right), \quad (33)$$

со следующими граничными условиями:

1) на границе расплав – корочка затвердевшего металла:

$$T(r, t)_{r_{жс}} = T_{жс}, \quad (34)$$

где $T_{жс}$ – температура жидкого металла в двухфазной области, К.

2) на поверхности заготовки:

$$-\lambda(T, r) \cdot \left(\frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \right)_{r=R} = q^0(t), \quad (35)$$

где $q^0(t)$ – плотность теплового потока на охлаждаемой поверхности затвердевшей корочки металла, Вт/м².

Температуру ликвидус принимали равной 1500 °С, а температуру солидус – 1450 °С. Температуру границы раздела фаз принимали равной температуре двухфазной зоны, которая определяется как среднее арифметическое между температурами жидкого металла и внутренней поверхности затвердевшей корочки. Таким образом, на стороне затвердевающей круглой заготовки принимали граничные условия I рода, а на охлаждаемой поверхности – граничные условия III рода.

Плотность теплового потока на охлаждаемой поверхности рассчитывали по следующей формуле:

$$q^0(t) = \alpha \cdot (T(R, t) - T_{охл}) + \sigma_0 \cdot \varepsilon_{пр} \cdot (T^4(R, t) - T_0^4), \quad (36)$$

где $T(R, t)$ – температура наружной поверхности затвердевшей корочки, К;

$T_{охл}$ – температура охлаждающей среды, К;

T_0 – температура окружающей среды, К;

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

$\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведённая степень черноты наружной поверхности корочки в кристаллизаторе;

$\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – постоянная Стефана-Больцмана.

Приведенная степень черноты для системы поверхность затвердевающего металла-стенка кристаллизатора рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{me}} + \frac{1}{\varepsilon_{stk}} - 1} \quad (37)$$

где $\varepsilon_{me} = 0,8$ – степень черноты поверхности затвердевающей заготовки в кристаллизаторе;

$\varepsilon_{stk} = 0,7$ – степень черноты внутренней поверхности кристаллизатора.

Для расчётов принимали длину активной зоны кристаллизатора 0,8 м, диаметр отливаемых заготовок равным 250 мм, а скорость разливки 0,7 м/мин. Из теоретических исследований [26] предполагалось, что корочка затвердевшего металла начинает практически сразу после попадания в кристаллизатор отходить от его стенок.

В первую очередь было исследовано влияние скорости движения охлаждающей воды в медной стенке кристаллизатора на интенсивность затвердевания заготовки. Исследовалось несколько режимов охлаждения, в каждом из которых изменялись коэффициенты теплоотдачи от медной стенки кристаллизатора к охлаждающей воде. Для различных коэффициентов теплоотдачи от медной стенки кристаллизатора к охлаждающей воде $\alpha_{\text{в}}$ получены на выходе из кристаллизатора следующие значения толщины корочки металла δ [83]:

- при $\alpha_{\text{в}}=10000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ $\delta = 23 \text{ мм}$;
- при $\alpha_{\text{в}}=14286 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ $\delta = 23 \text{ мм}$;
- при $\alpha_{\text{в}}=20000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ $\delta = 24 \text{ мм}$.

Результаты исследований представлены на рисунках 10 и 11.

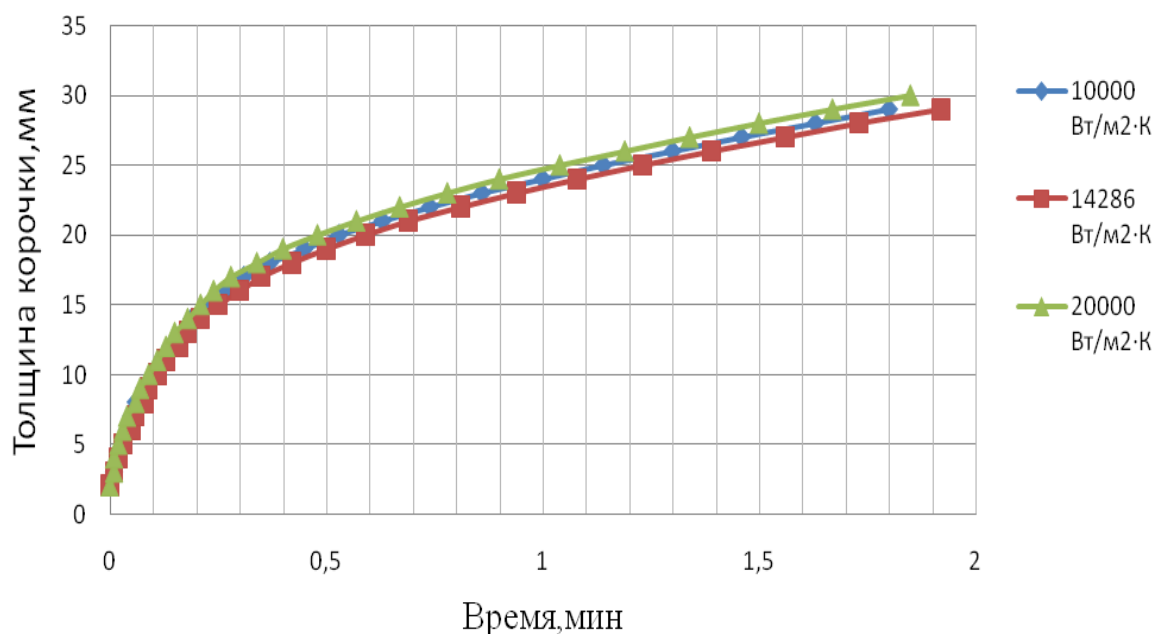


Рис. 10 – Рост толщины корочки металла во времени (в зазоре воздух)

Как видно на рисунке 11, в кристаллизаторе вначале наблюдается резкое снижение температуры до $700\text{ }^{\circ}\text{C}$, а затем резкий разогрев поверхности, который связан с появлением воздушного зазора. Зазор создаёт дополнительное термическое сопротивление, тем самым уменьшая теплоотвод от поверхности заготовки к охлаждающей воде. Происходит разогрев поверхности, который может привести к утончению корочки, а, следовательно, и к прорыву жидкого металла в кристаллизаторе. Также разогрев поверхности приводит к появлению трещин на поверхности металла.

Анализируя полученные данные при разных коэффициентах теплоотдачи от медной стенки кристаллизатора к охлаждающей воде (10, 14,5 и 20 кВт/(м²·К)) можно сделать вывод о том, что существенных изменений в температурном распределении поверхности корочки не обнаружилось. Это объясняется тем, что на данном участке тепловое сопротивление очень мало и поэтому влиять на данный параметр бессмысленно. В связи с этим на практике скорость движения воды не превышает 3-5 м/с.

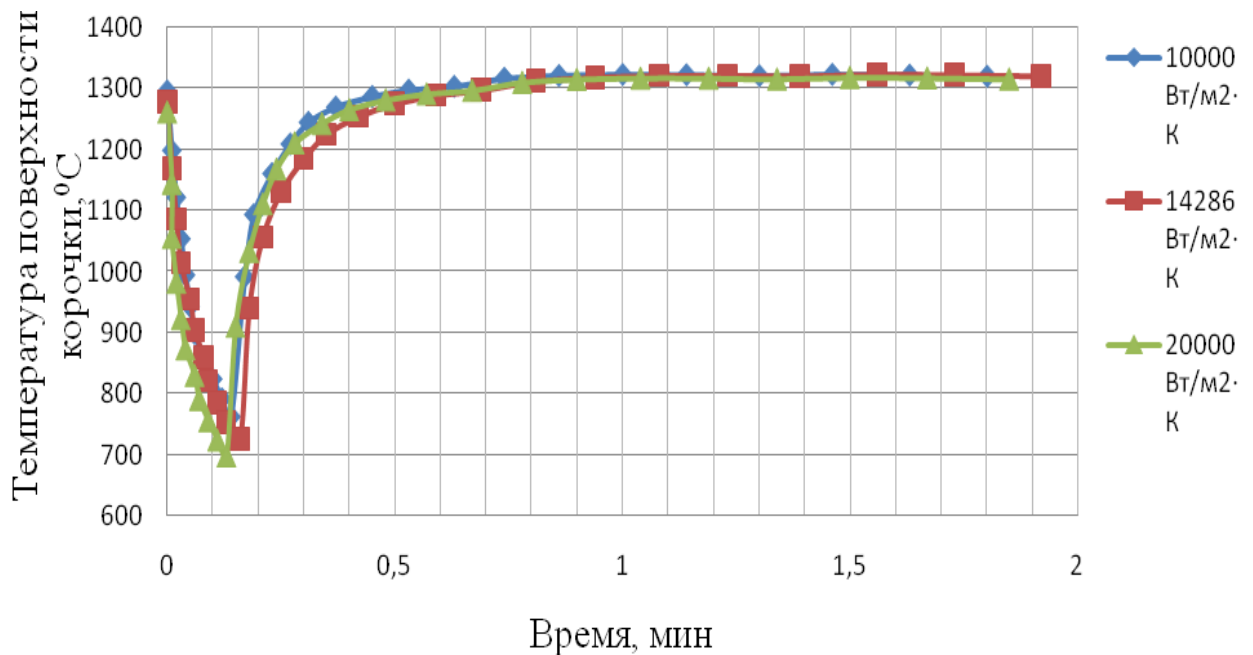


Рис. 11 – Изменение температуры поверхности заготовки во времени (в зазоре воздух)

Также предполагалось, что пространство между корочкой затвердевшего металла и стенками кристаллизатора заполняет воздух. Из рисунка 11 видно, что в области отхода затвердевшего металла от стенки кристаллизатора наблюдается сильный разогрев поверхности заготовки и дальнейший рост её температуры. Следовательно, толщина зазора и теплопроводность среды, которая его заполняет, существенно влияет на тепловое состояние заготовки в кристаллизаторе. Поэтому в дальнейшем исследовали влияние этих величин на интенсивность теплоотвода в кристаллизаторе.

В дальнейшем исследовали изменение толщины затвердевающей корочки в кристаллизаторе, если в зазоре находится водород, а не воздух, так как величина теплопроводности у водорода больше.

Результаты исследований представлены на рисунках 12 и 13.

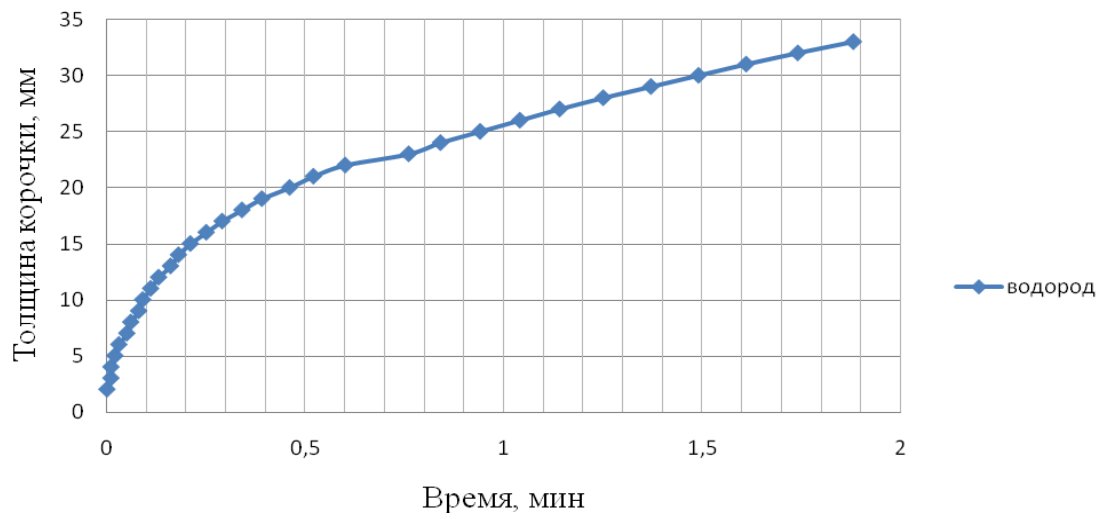


Рис. 12 – Рост толщины корочки металла во времени (в зазоре водорода)

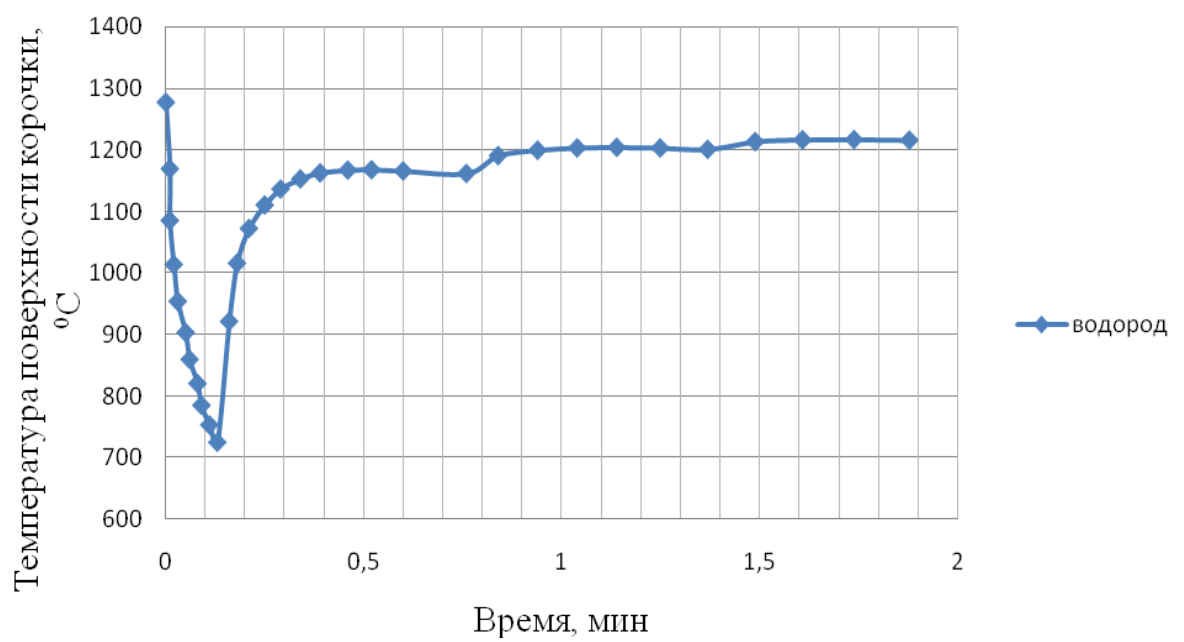


Рис. 13 – Изменение температуры поверхности заготовки во времени (в зазоре водорода)

Из полученных результатов видно, что при увеличении теплопроводности среды в зазоре корочка на выходе из кристаллизатора за то же самое время увеличилась и стала равной 32 мм.

Из рисунка 13 видно, что разогрев поверхности уменьшился, но незначительно, и по-прежнему превышает допустимые значения. Также наблюдается недопустимое резкое снижение температуры в зоне образования зазора в начале процесса затвердевания в кристаллизаторе.

Для проверки влияния толщины газового зазора между корочкой металла и стенками гильзы кристаллизатора на тепловое состояние затвердевающей заготовки был исследован процесс в кристаллизаторе с конусностью 1%. Кристаллизаторы с такой конусностью помогают обеспечить монотонное снижение температуры, исключив её перепады по длине заготовки. Предполагалось, что в зазоре находятся воздух или водород. Результаты данных исследований приведены на рисунках 14 и 15.

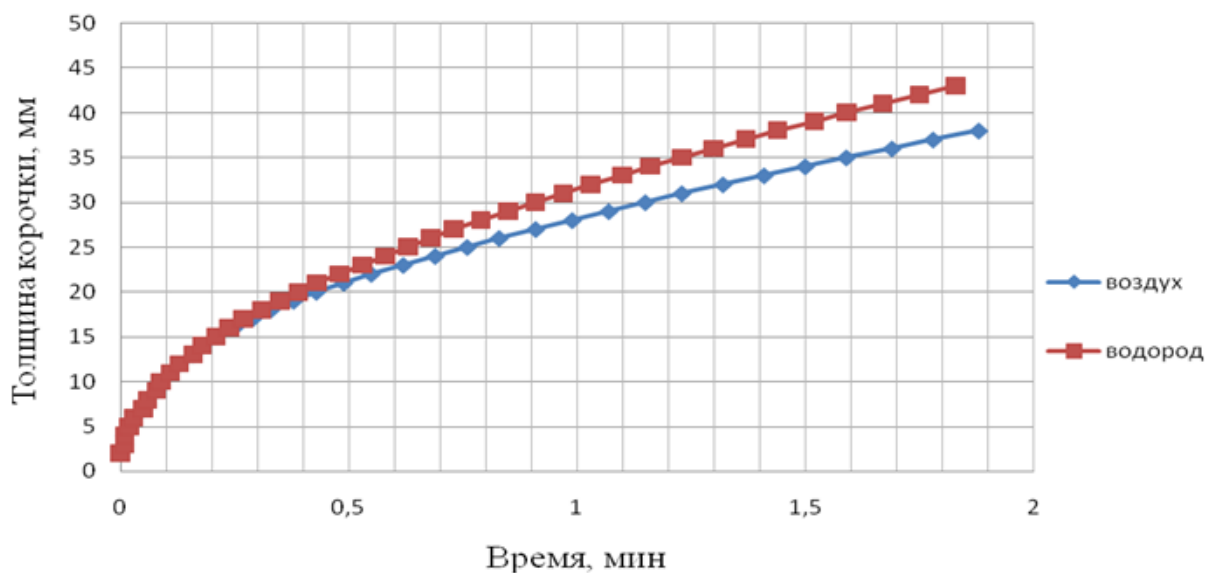


Рис. 14 – Рост толщины корочки металла во времени (с конусностью)

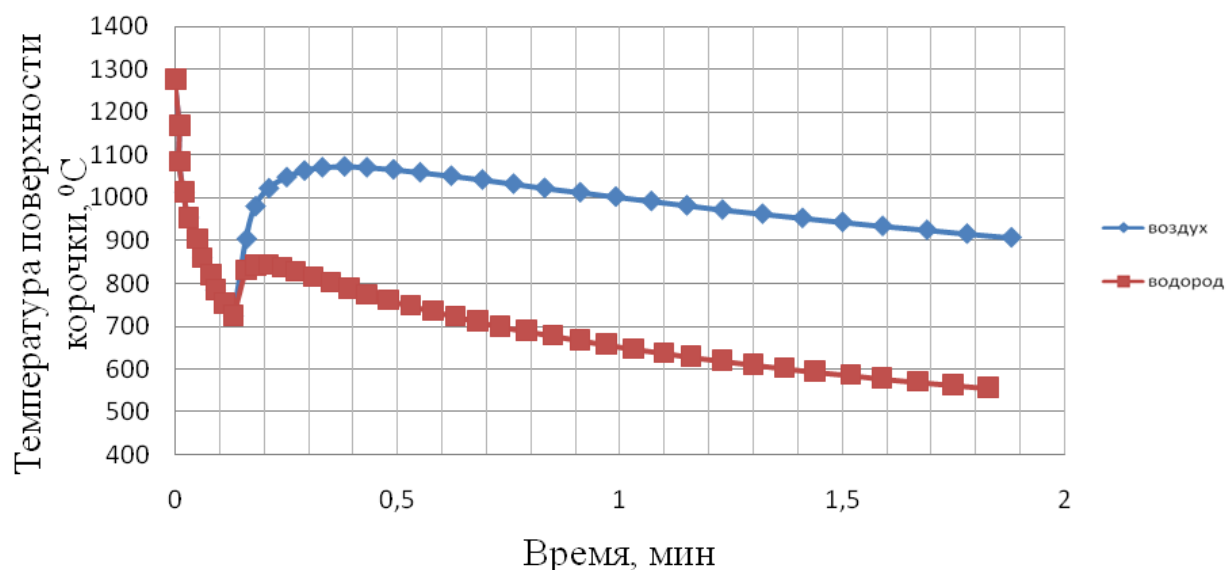


Рис. 15 – Изменение температуры поверхности заготовки во времени (с конусностью)

Из анализа данных графиков видно, что при использовании кристаллизаторов с конусностью наблюдается значительный рост толщины корочки (более 20%) по сравнению с кристаллизатором без конусности.

Как видно из результатов исследований при использовании в зазоре водорода на выходе из кристаллизатора имеет место значительное переохлаждение поверхности заготовки (до 550 °C), что не соответствует рекомендуемым требованиям рационального теплового режима.

Кроме того, в верхней части кристаллизатора происходит очень интенсивный теплоотвод в силу плотного контакта со стенками кристаллизатора и температура снижается до 700 °C. Это сильный тепловой удар по корочке, который может стать причиной образования наружных трещин, так как многие марки сталей требуют медленного монотонного снижения температуры по длине.

Таким образом, все вышеперечисленные тепловые режимы охлаждения заготовок в кристаллизаторе не удовлетворяют предъявляемым требованиям к рациональному режиму.

Для достижения необходимого эффекта монотонного снижения температуры по длине заготовки и обеспечения рационального теплового режима было проведено исследование процесса затвердевания при разливке металла под слоем шлакообразующей смеси (ШОС). Подробные исследования влияния различных шлакообразующих смесей на процессы теплообмена между кристаллизатором и поверхностью затвердевающей заготовки были проведены в работе Ноздрин А.А. [84]. Для исследования в данной работе были взяты разные составы ШОС с различными коэффициентами теплопроводности. Результаты учета ШОС представлены на рисунках 16 и 17.

Как видно из графиков, разливка металла под слоем ШОС приводит к тому, что поверхность заготовки будет охлаждаться равномерно и практически без разгогрева. Но отметим, что при разливке под ШОС с коэффициентом теплопроводности $\lambda=0,5$ (Вт/м·К) корочка на выходе из кристаллизатора будет иметь температуру больше $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$, что выше требуемого значения с точки зрения рациональных режимов охлаждения. Превышение допустимой температуры поверхности по длине заготовки может привести к образованию овальности и наружным трещинам, которые могут спровоцировать прорыв корочки металла. Также это означает, что на дальнейших этапах формирования заготовки потребуется увеличить расход охлаждающей воды, чтобы обеспечить более равномерное снижение температуры по длине заготовки. Разливка под ШОС с коэффициентом теплопроводности $\lambda=2$ (Вт/м·К) приведёт к значительному переохлаждению заготовки на выходе из кристаллизатора, ниже $900\text{ }^{\circ}\text{C}$, что также не соответствует технологическим требованиям. Исходя из проведённых исследований для достижения требуемых технологических параметров процесса непрерывной разливки наиболее целесообразным является выбор ШОС с коэффициентом теплопроводности $\lambda=0,9$ Вт/(м·К), так как она позволит обеспечить разливку с соблюдением необходимого теплового режима.

Результаты расчётов изменения температуры по длине заготовки и толщины затвердевающей корочки для разливки под ШОС с коэффициентом

теплопроводности $\lambda=0.9$ Вт/(м·К) согласно разработанной математической модели представлены на рисунках 18 и 19.

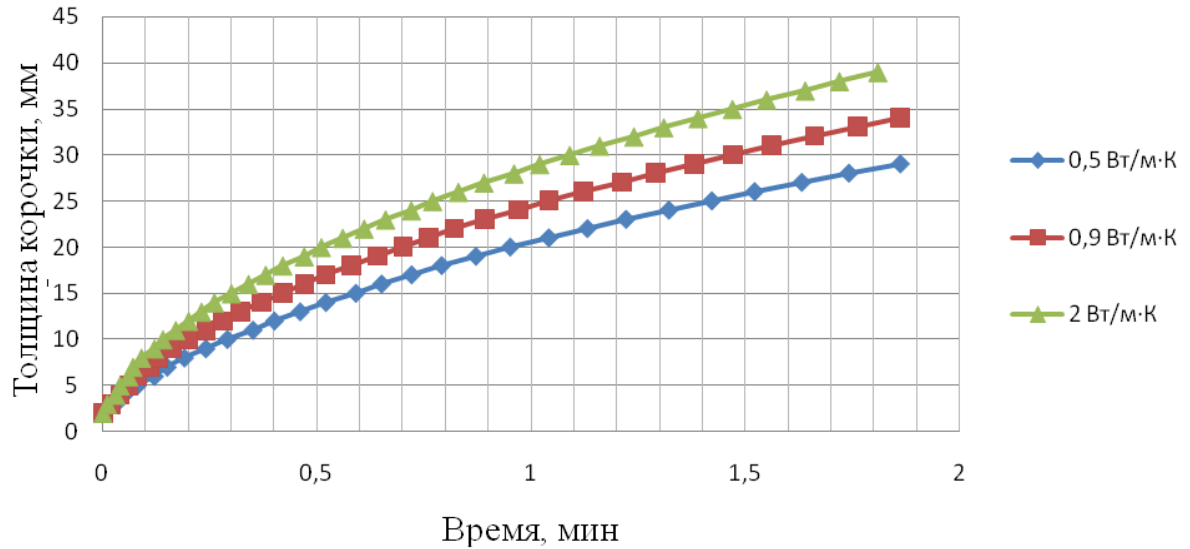


Рис. 16 – Рост толщины корочки металла во времени при различной теплопроводности материалов, заполняющих зазор

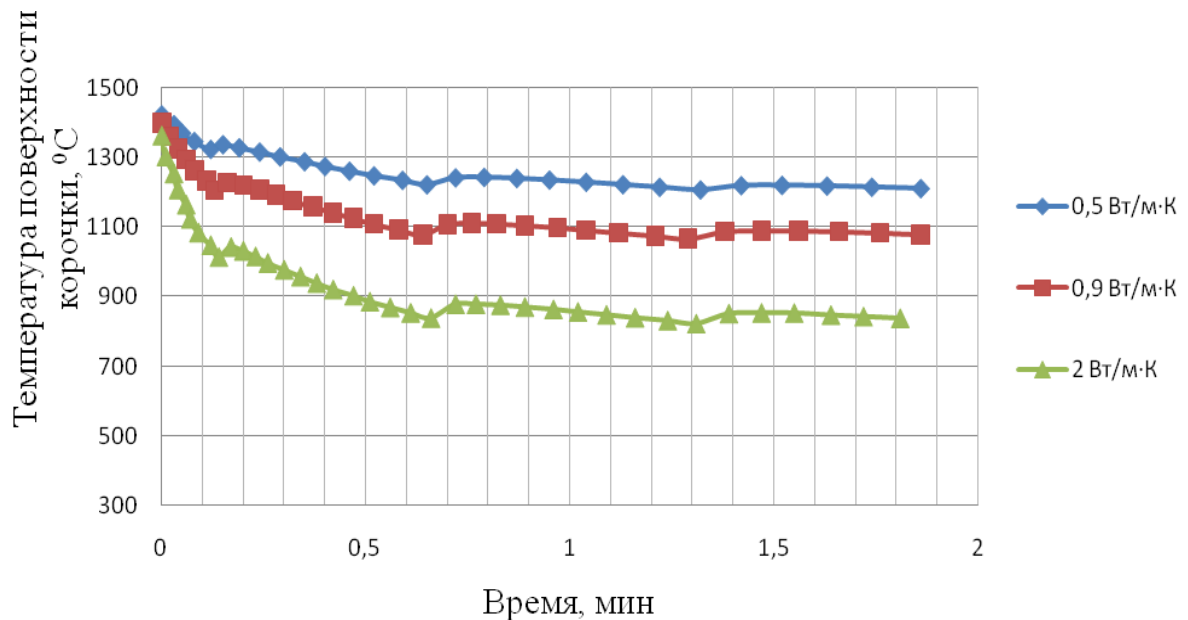


Рис. 17 – Изменение температуры поверхности заготовки во времени, при различной теплопроводности материалов, заполняющих зазор

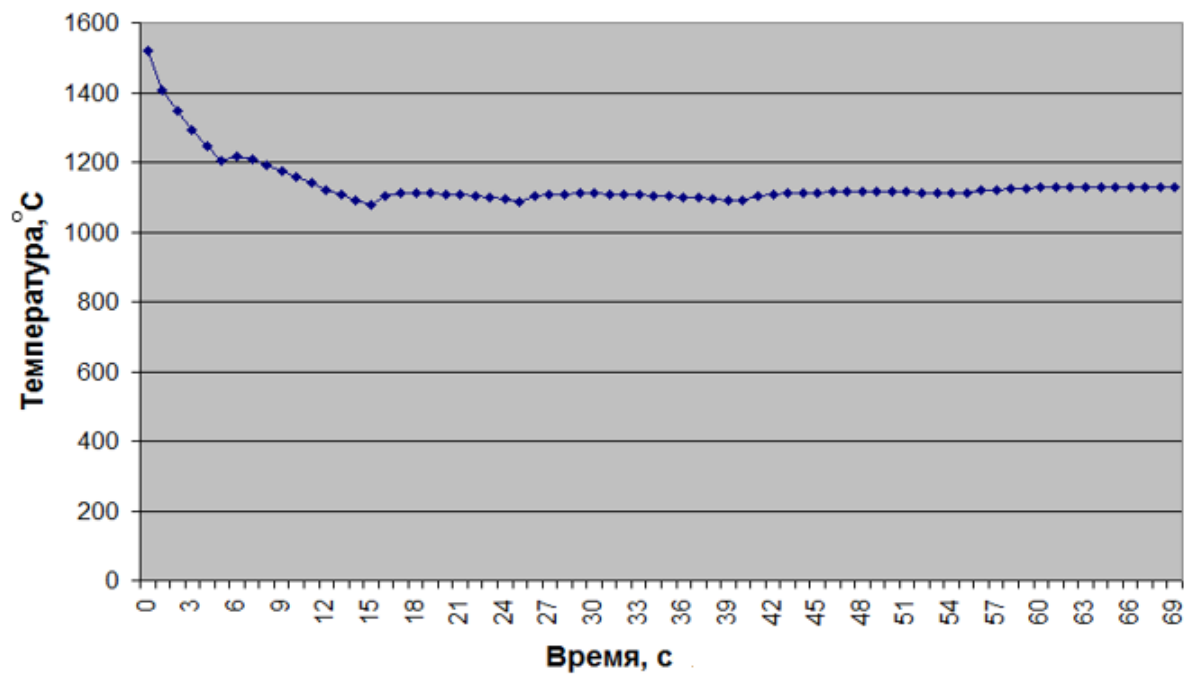


Рис. 18 – Изменение температуры расплава в кристаллизаторе во времени

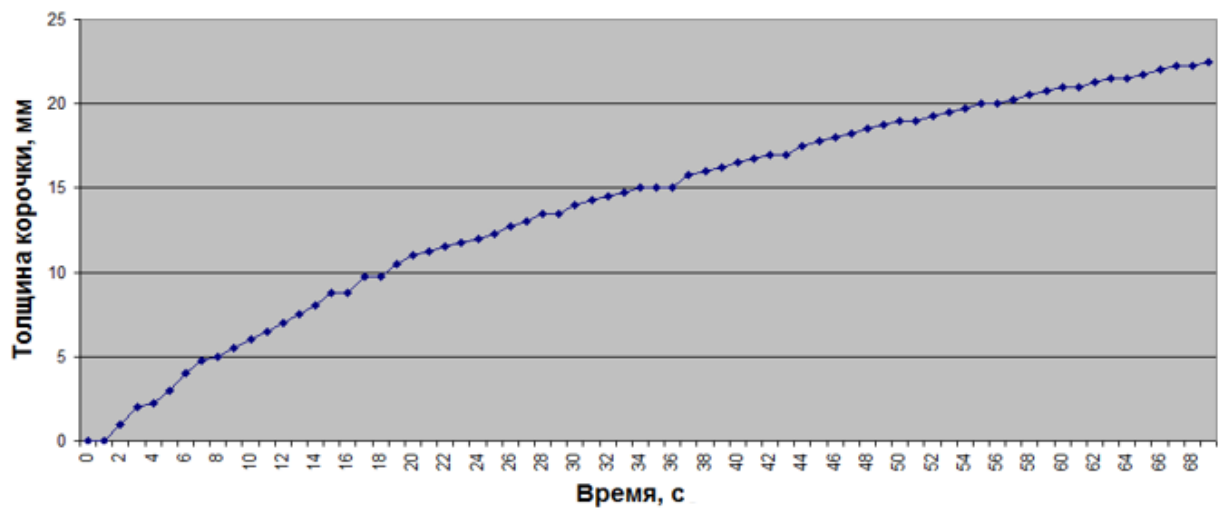


Рис. 19 – И изменение толщины корочки в кристаллизаторе во времени

Благодаря проведённым исследованиям выбирается рациональный тепловой режим для разливки круглых заготовок диаметром 250 мм в кристаллизаторе, параметры которого будут исходными для исследования тепловых состояний затвердевающей заготовки в зоне вторичного охлаждения.

Данный режим характеризуется следующими параметрами:

- скорость разливки $v=0,7$ м/мин;
- толщина корочки заготовки на выходе из кристаллизатора $l=23$ мм;
- температура поверхности корочки на выходе из кристаллизатора $T=1130$ °С;
- в зазор между расплавом и стенкой кристаллизатора подаётся шлакообразующая смесь (ШОС) с коэффициентом теплопроводности $\lambda=0,9$ Вт/(м·К);
- температура поверхности корочки на выходе из кристаллизатора $T=1130$ °С;
- время пребывания расплава в кристаллизаторе до образования корочки толщиной 23 мм $t=1,15$ мин.

В результате анализа рисунков 16, 17, 18 и 19 можно сделать вывод, что при разливке под ШОС возможно обеспечить монотонное снижение температуры по поверхности корочки, а также допустимый уровень температур на выходе из кристаллизатора. При использовании ШОС с коэффициентом теплопроводности $\lambda=0,9$ Вт/(м·К) обеспечивается требуемый уровень температур на выходе из кристаллизатора (около 1100 °С) и отсутствует резкий перепад температур в начале кристаллизатора. Таким образом, разливка металла под слоем ШОС стабилизирует теплоотвод, особенно в верхней части кристаллизатора, позволяет значительно увеличить качество получаемых заготовок и избежать прорывов кристаллизатора, связанных с резкими перепадами температур по поверхности заготовки при незначительном количестве затвердевшего металла.

3.2 Исследование теплового состояния заготовок в зоне вторичного охлаждения в процессе непрерывной разливки стали

3.2.1 Анализ рабочего теплового режима зоны вторичного охлаждения в процессах непрерывной разливки заготовок круглого сечения из высококачественных марок сталей

Согласно принятой ранее гипотезе [83], тепловые условия в заготовке являются фактором, определяющим показатели качества заготовки, что позволяет на основе информации о температурных полях заготовки в различные периоды процесса затвердевания прогнозировать данные показатели и целенаправленно управлять ими.

Методом математического моделирования проведено исследование процесса охлаждения заготовки в зоне вторичного охлаждения и на воздухе при скорости разливки $v=0,7$ м/мин с целью исследования режимов охлаждения заготовки, применяемых на машинах непрерывного литья.

Процесс непрерывной разливки происходит в 2 этапа:

- 1) формирование заданной длины и формы разливаемого металла;
- 2) обеспечение полного затвердевания сформировавшейся заготовки.

Для расчётов в ЗВО принимались данные актуальные для машины непрерывного литья заготовок диаметром 250 мм. Зона вторичного охлаждения имеет длину 3,59 м и разделена на 3 секции. Длина первой секции – 0,38 м, 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/(м²·К) соответственно.

Расчётами согласно разработанной математической модели определены следующие температуры и толщины затвердевшего металла в ЗВО при скорости разливки $v=0,7$ м/мин

Таблица 4 – Параметры охлаждения заготовки в ЗВО при скорости разливки $v=0,7$ 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)
1	0,38	958	29	500
2	1,17	876	46,5	350
3	2,04	850	71,5	200

Изменение данных параметров показано на рисунке 20.

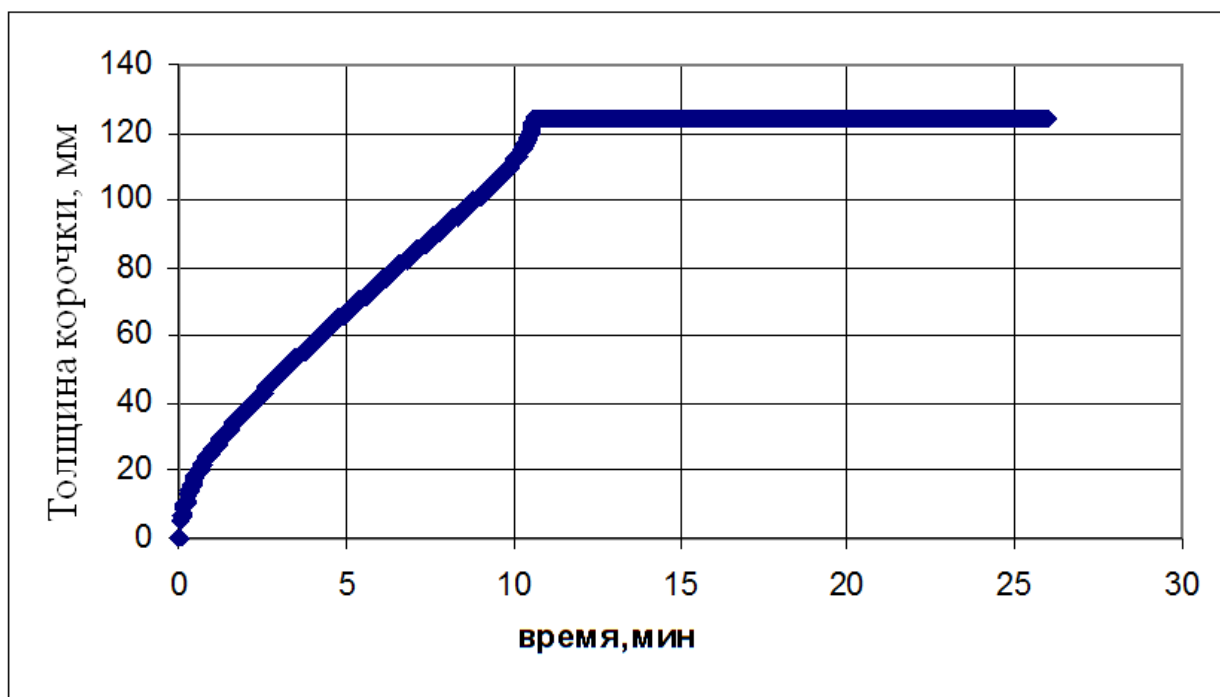


Рис. 20 – Изменение толщины корочки затвердевшего металла во времени

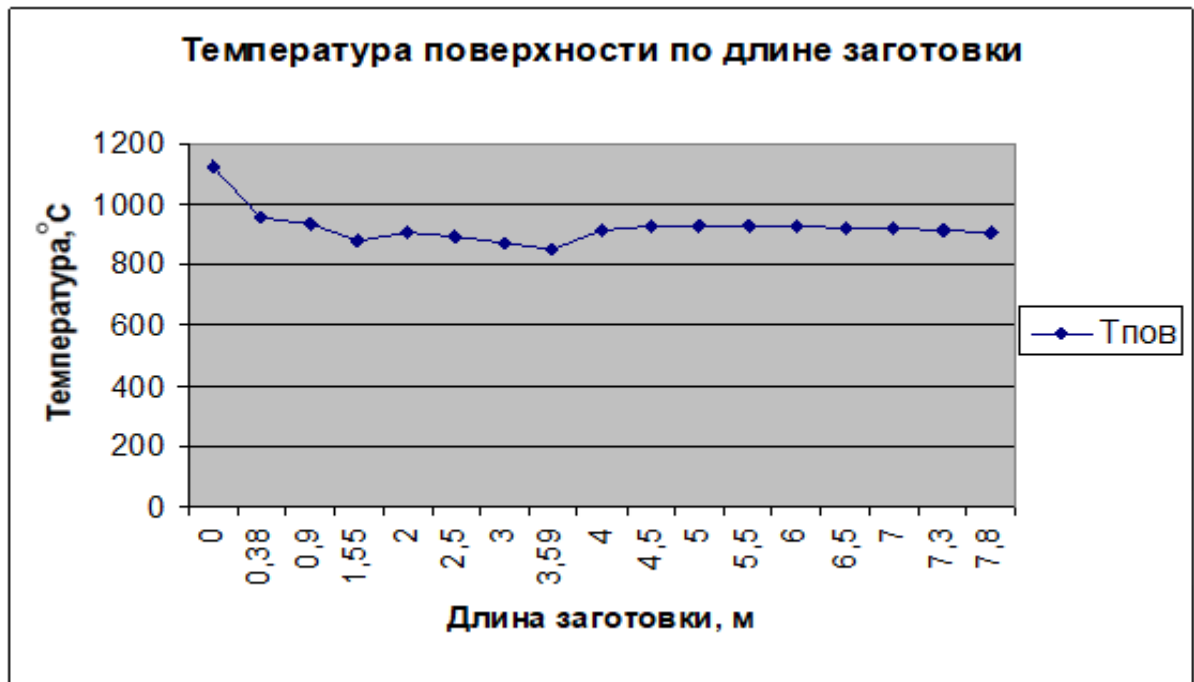


Рис. 21 – Изменение температуры поверхности заготовки по её длине в зоне вторичного охлаждения и на воздухе

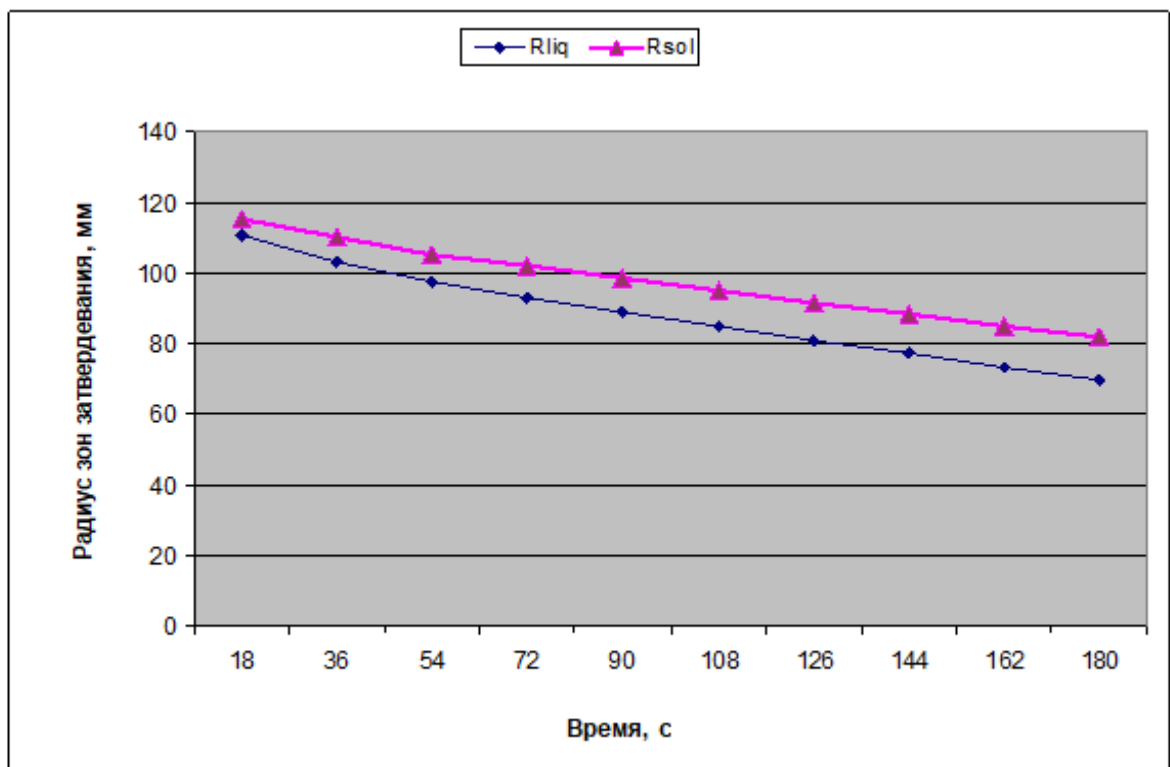


Рис. 22 – Изменение радиусов жидкой и твёрдой фаз в процессе охлаждения заготовки

Анализируя данные графики, можно сделать следующие выводы о режимах охлаждения в ЗВО при скорости разливки $v=0,7$ м /мин.

Рисунок 20 показывает нарастание корочки во времени. Из него видно, что корочка равномерно нарастает по всей длине и на 12-ой минуте происходит закрытие конуса жидкого металла благодаря его полной кристаллизации по сечению.

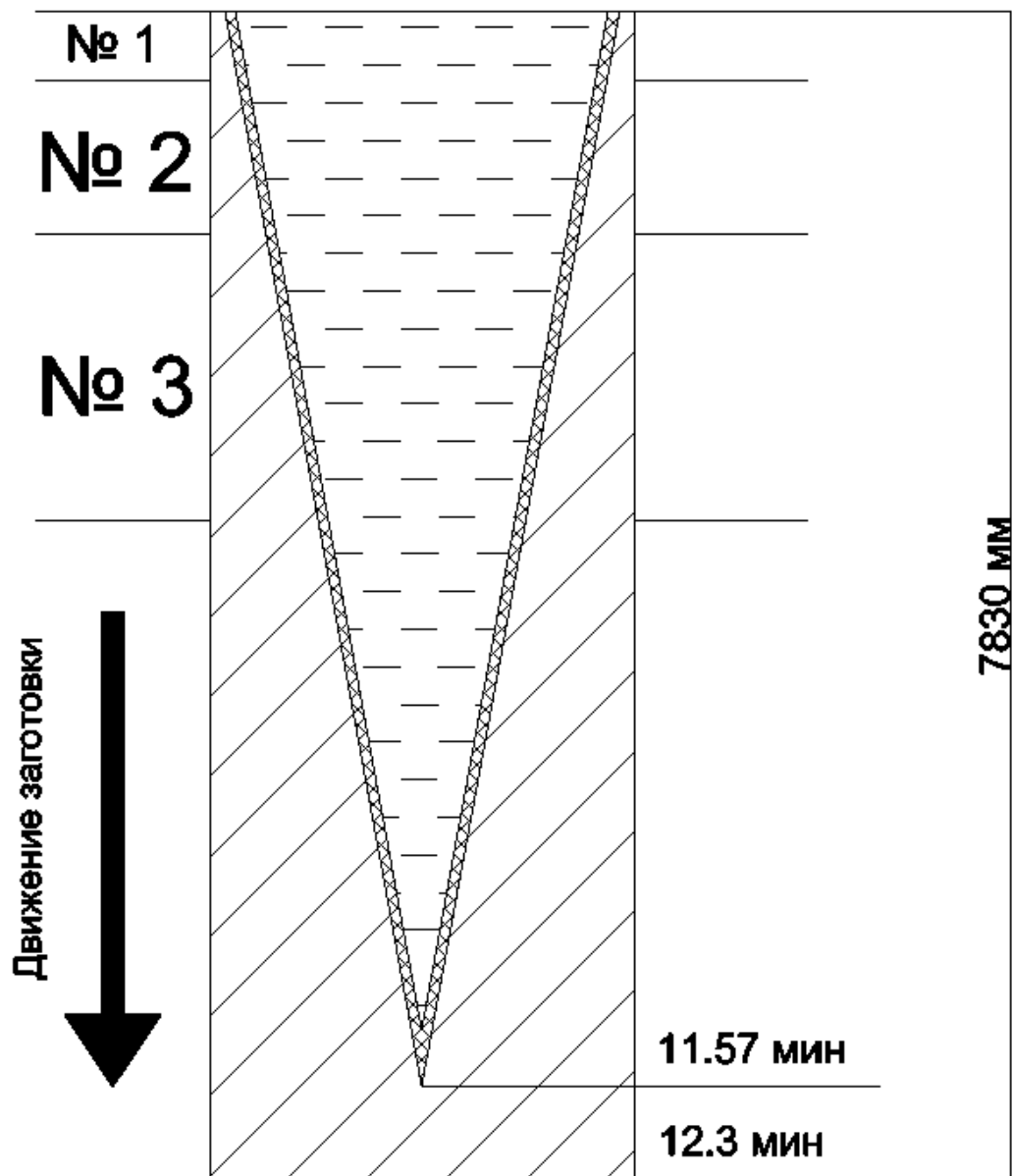
Согласно рисунку 22 видно, что двухфазная зона развивается с самого начала процесса охлаждения и растёт со временем. Следовательно, область жидко-твёрдого состояния затвердевающего металла увеличивается по длине заготовки. Это может привести к увеличению количества дефектов непрерывнолитой заготовки. Для увеличения качества получаемых заготовок ширину двухфазной области необходимо уменьшать.

Анализируя рисунок 21, можно сделать вывод о том, что при рабочем режиме охлаждения на поверхности заготовки имеются участки разогрева. Особенно это заметно в области выхода на воздух. После выхода из зоны вторичного охлаждения на воздух на участке длины от 3,59 метра до 5,15 метра происходит постепенный разогрев поверхности с 854 до 930 градусов, то есть на 76°C , что может привести к появлению поверхностных и внутренних дефектов в получаемой заготовке. Также необходимо отметить резкое падение температуры поверхности заготовки при входе в первую секцию вторичного охлаждения, что обусловлено высокой интенсивностью теплоотвода в этой зоне ($\alpha=500$ Вт/м²·К). В силу того, что толщина затвердевшего металла на выходе из кристаллизатора составляет только 24 мм, такое резкое увеличение интенсивности теплоотвода может привести к превышению допустимых термических напряжений и появлению трещин на поверхности металла, и, даже, к прорыву жидкого металла в первой секции зоны вторичного охлаждения.

В ходе данных исследований было получено итоговое время разливки заготовки до полного затвердевания равное 12,3 минуты (с учётом времени затвердевания в кристаллизаторе).

Время полного затвердевания заготовки в зонах вторичного охлаждения и на воздухе составляет 11,57 мин.

Расположение конуса жидкого металла в процессе затвердевания показано на рис. 23.



1 – область жидкой фазы, 2 – затвердевшая область, 3 – область двухфазного состояния; № 1 – первая секция ЗВО, № 2 – вторая секция ЗВО, № 3 – третья секция ЗВО

Рис. 23 – Расположение конуса жидкого металла в процессе непрерывной разливки

Основными недостатками данного режима является разогрев поверхности затвердевающего металла на участке воздушного охлаждения после выхода из ЗВО, резкое падение температуры поверхности металла на выходе из кристаллизатора, что может привести к превышению допустимых термических напряжений и большая протяжённость, больше 7 метров, жидкокристаллической лунки в заготовке. Кроме того жидкометаллическая лунка оказывает сильное внутреннее давление на затвердевшую часть заготовки, что также может привести к появлению внутренних и наружных трещин. В силу перечисленных недостатков данного режима были проведены дальнейшие исследования тепловых состояний круглой непрерывнолитой заготовки с целью поиска рационального режима охлаждения.

3.2.2 Расчёт скорости затвердевания и распределения температуры в затвердевающей заготовке при различных условиях работы ЗВО

Одним из важнейших параметров, влияющим на тепловое состояние непрерывнолитой заготовки, является скорость разливки. Так как режим при скорости разливки $v=0,7$ м/мин имеет существенные недостатки, то были проведены исследования процесса охлаждения круглых непрерывнолитых заготовок при скоростях разливки от $v=0,6$ м/мин до $v=0,69$ м/мин с целью нахождения наиболее рационального режима охлаждения. При этом процесс формирования заготовки исследуется в приближении модели охлаждения, описанной в главе 2, и физико-химический процесс кристаллизации из рассмотрения исключается [80].

Расчётами определены следующие параметры процесса охлаждения заготовки в ЗВО при скоростях разливки $v=0,65$ м/мин и $0,6$ м/мин.

Таблица 5 - Параметры охлаждения заготовки в ЗВО при скорости разливки $v=0,65$ м/мин и $v=0,6$ 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)
		$v=0,65$ м/мин	$v=0,6$ м/мин	$v=0,65$ м/мин	$v=0,6$ м/мин	
1	0,38	940	912	31	34	500
2	1,17	856	825	50	54	350
3	2,04	829	795	76	84	200

Сравнительные графики изменения температуры поверхности заготовки, толщины затвердевающего металла и толщины двухфазной зоны при скоростях разливки $v=0,7$ м /мин, $0,65$ м/мин и $0,6$ м/мин.

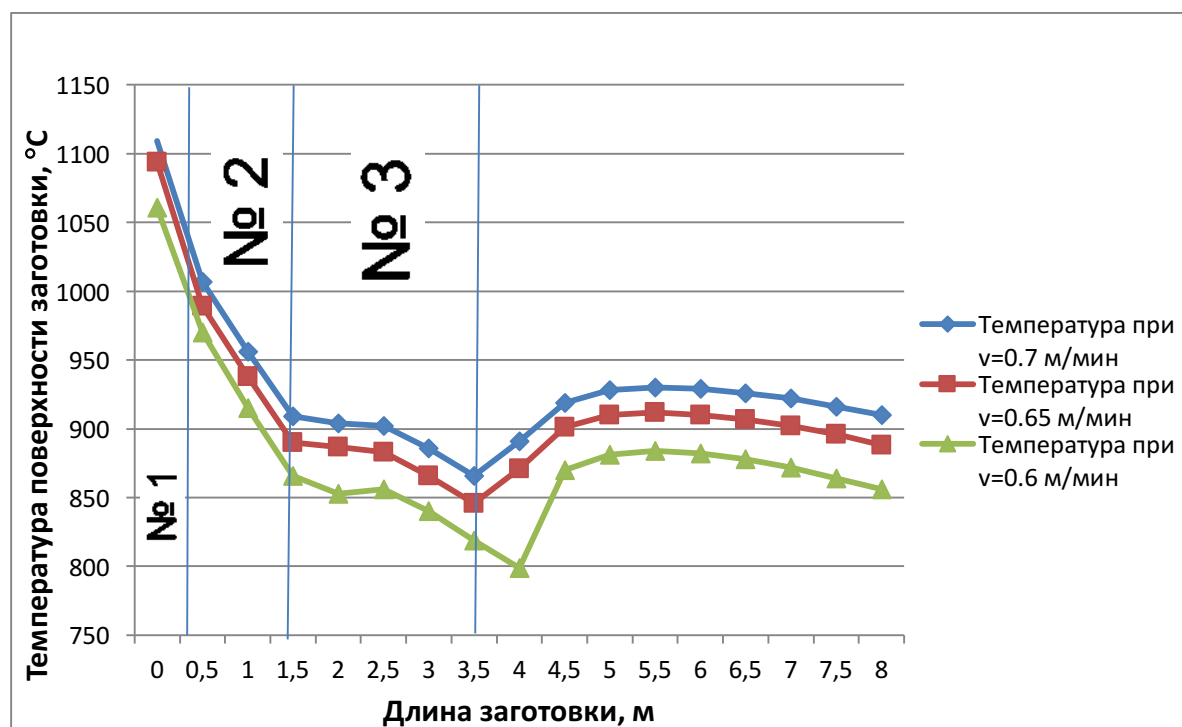


Рис. 24 – Изменение температуры поверхности заготовки при разных скоростях разливки

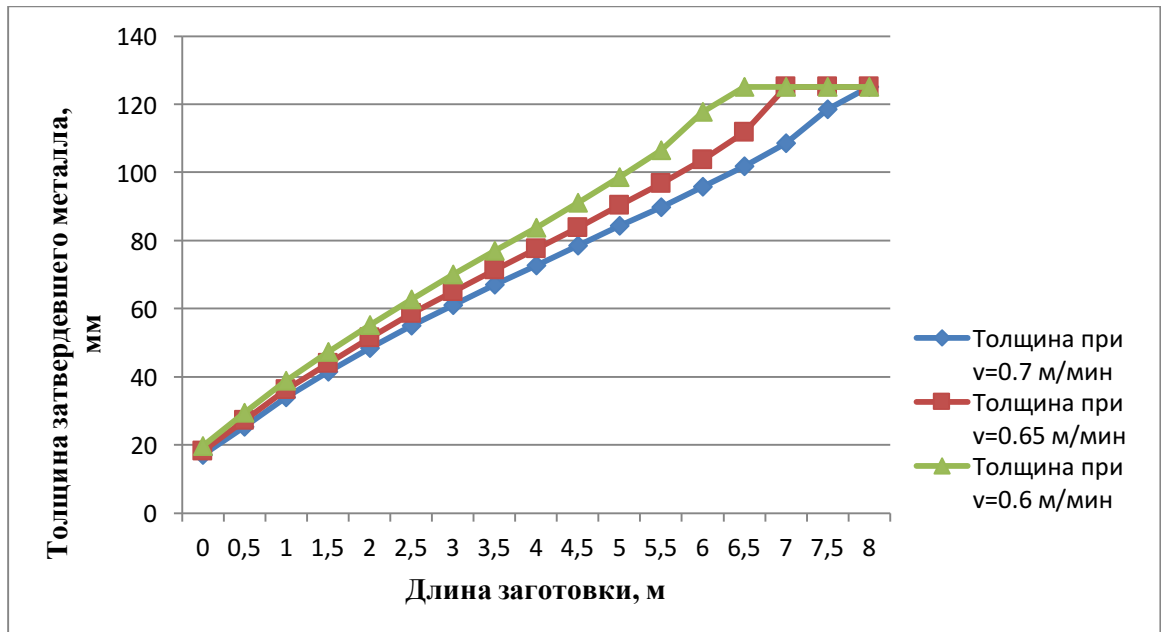


Рис. 25 – Изменение толщины затвердевшего металла при разных скоростях разливки

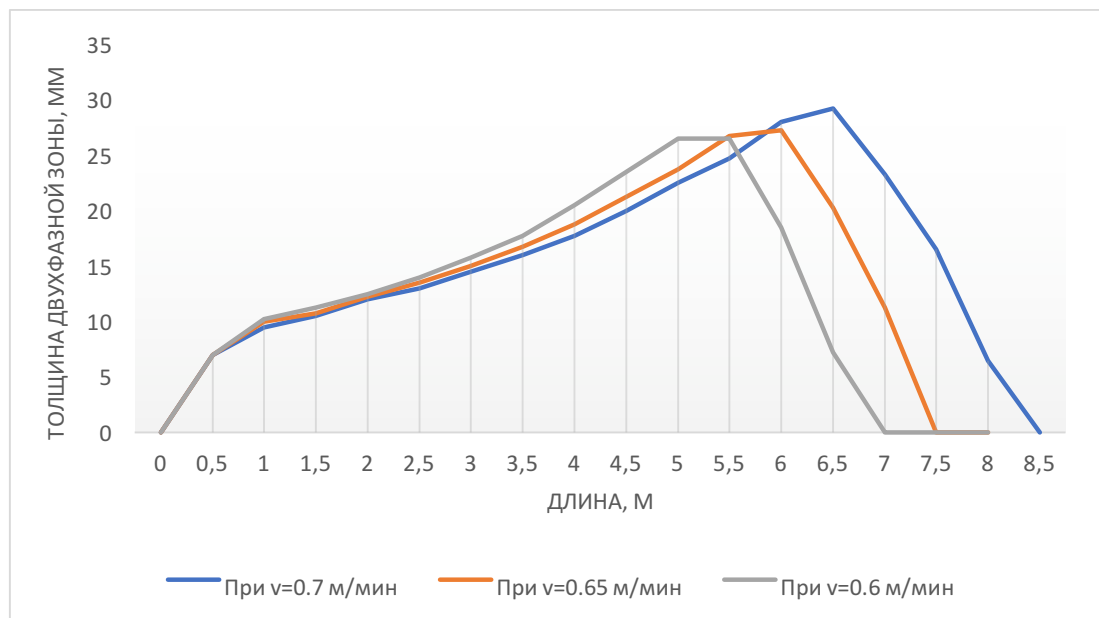
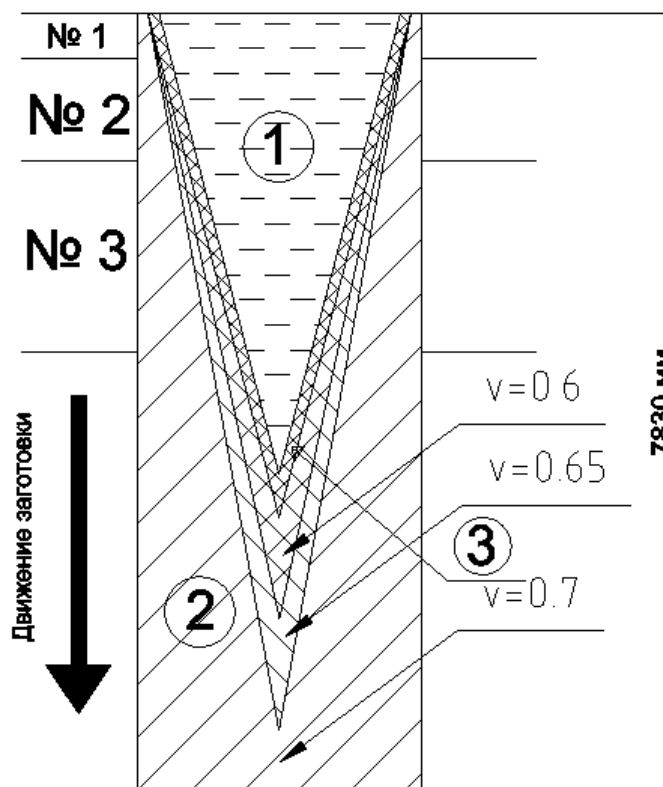


Рис. 26 – Изменение толщины двухфазной зоны при разных скоростях разливки



1 – область жидкой фазы, 2 – затвердевшая область, 3 – область двухфазного состояния; № 1 – первая секция ЗВО, № 2 – вторая секция ЗВО, № 3 – третья секция ЗВО

Рис. 27 – Сравнительное положение жидкометаллической лунки при скоростях разливки $v = 0,7$ м /мин, $0,65$ м /мин и $0,6$ м /мин

Как видно из рисунка 24, при $v=0,65$ м/мин изменение температуры поверхности заготовки происходит более равномерно, чем при $v=0,7$ м /мин и при этом не наблюдается значительного снижения температуры поверхности металла при выходе на воздух, как при скорости разливки $v=0,6$ м /мин. Так же из рисунков 25 и 26 видно, что при скорости $v=0,6$ м /мин происходит наиболее быстрое затвердевание по сечению заготовки, но при этом наблюдается сильное охлаждение поверхности заготовки на воздухе (меньше 800°C). Также видно, что при скорости разливки $0,6$ м/мин на выходе из кристаллизатора температура поверхности заготовки становится меньше 1100°C , что не соответствует технологическим требованиям разливки [3, 4]. Из

вышенаписанного следует, что наиболее подходящим режимом охлаждения в ЗВО можно считать режим при скорости вытягивания $v = 0,65$ м/мин. Но данный режим также имеет некоторые недостатки. При его реализации происходит разогрев поверхности заготовки свыше $900\text{ }^{\circ}\text{C}$, что может привести к образованию большого слоя окалины на поверхности затвердевшего металла в силу интенсивного теплоотвода. Также очень важно отметить, что на выходе из кристаллизатора происходит резкое снижение температуры поверхности заготовки в силу интенсивного теплоотвода в первой зоне вторичного охлаждения, что, как отмечалось выше, может привести к превышению допустимых термических напряжений и вызвать появление внутренних и наружных дефектов. Для наглядности различий режимов охлаждения при разных скоростях разливки приводится сравнительная таблица параметров процесса затвердевания непрерывнолитой заготовки в таблице 6.

Таблица 6 – Сравнение параметров процесса непрерывной разливки при скоростях $v=0,7$ м /мин, $0,65$ м /мин и $0,6$ м /мин

Скорость разливки, м/мин	Температура на выходе из кристаллизатора, $^{\circ}\text{C}$	Толщина корочки на выходе из кристаллизатора, мм	Время пребывания металла в кристаллизаторе, мин	Протяжённость жидкометаллической лунки в момент затвердевания заготовки, м	Время затвердевания заготовки, мин
0,7	1130	22,5	1,15	7,5	12,3
0,65	1105	24	1,24	6,6	13,2
0,6	1074	26,5	1,38	5,8	14,4

С целью поиска наиболее рациональных параметров непрерывной разливки и предотвращения вышеперечисленных недостатков исследованных режимов были проведены дополнительные исследования режимов охлаждения

при скорости разливки $v=0,65$ м/мин. 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 интенсивности теплоотвода. Результаты исследований тепловых режимов в первой секции ЗВО при разных коэффициентах теплоотдачи представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Сравнительная таблица температур 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		
		$\alpha=500$ Вт/(м ² ·К)	$\alpha=450$ Вт/(м ² ·К)	$\alpha=400$ Вт/(м ² ·К)
0	1,24	1105	1105	1105
0,25	1,62	975	994	1013
0,36	1,79	947	968	997
Перепад температур на поверхности заготовки в первой секции ЗВО		150	129	106

В силу того, что корочка затвердевшего металла в первой зоне вторичного охлаждения тонкая, в первой секции ЗВО необходимо избежать значительных перепадов температур, чтобы минимизировать вероятность появления значительных термических напряжений. Исходя из этого, в ходе исследований было выявлено, что при коэффициенте теплоотдачи $\alpha=400$ Вт/(м²·К) перепад температур по поверхности заготовки в первой ЗВО будет наименьшим в сравнении с перепадом при коэффициентах теплоотдачи $\alpha=500$ и 450 Вт/(м²·К), а само уменьшение температуры по длине заготовки будет происходить

медленнее. С другой стороны, обеспечивать интенсивность теплоотвода с коэффициентом теплоотдачи меньше $400 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ нецелесообразно, чтобы существенно не замедлять процесс затвердевания в самом начале вытягивания заготовки и обеспечить необходимый температурный уровень по всей ее длине.

В дальнейших исследованиях тепловых состояний непрерывнолитых заготовок и поиске рационального режима стремились также избежать возможных термических напряжений, возникающих при значительных перепадах температур, 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 8 и 9. Все данные были получены благодаря расчётам по специально разработанной математической модели процесса охлаждения при непрерывной разливке стали.

Таблица 8 – Режимы охлаждения заготовок круглого сечения в процессе непрерывной разливки стали

Наименование режима	Конвективный коэффициент теплоотдачи по зонам вторичного охлаждения, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$		
	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 9 - Сравнение параметров непрерывной разливки при скорости $v=0,65$ м /мин и разной интенсивности теплоотвода в различных секциях 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 момент затвердевания заготовки, м	Время вытягивания разливки до момента затвердевания, мин	Время пребывания на воздухе при температуре выше 800 °С, мин
I	II	III					
500	380	200	828	907	6,5	12,48	4,53
500	300	225	820	909	6,62	12,66	4,64
500	380	225	806	899	6,43	12,37	4,35
500	350	225	810	903	6,5	12,48	4,46
450	320	200	841	918	6,68	12,76	4,71
450	320	220	823	903	6,62	12,68	4,66
400	300	225	824	913	6,7	12,79	4,77

На нижеприведённых рисунках 26, 27, 28 и 29 показано сравнительное изменение температуры поверхности заготовки и толщины затвердевшего металла при различных значениях коэффициентов теплоотдачи в разных секциях вторичного охлаждения при скорости разливки $v=0,65$ м/мин.

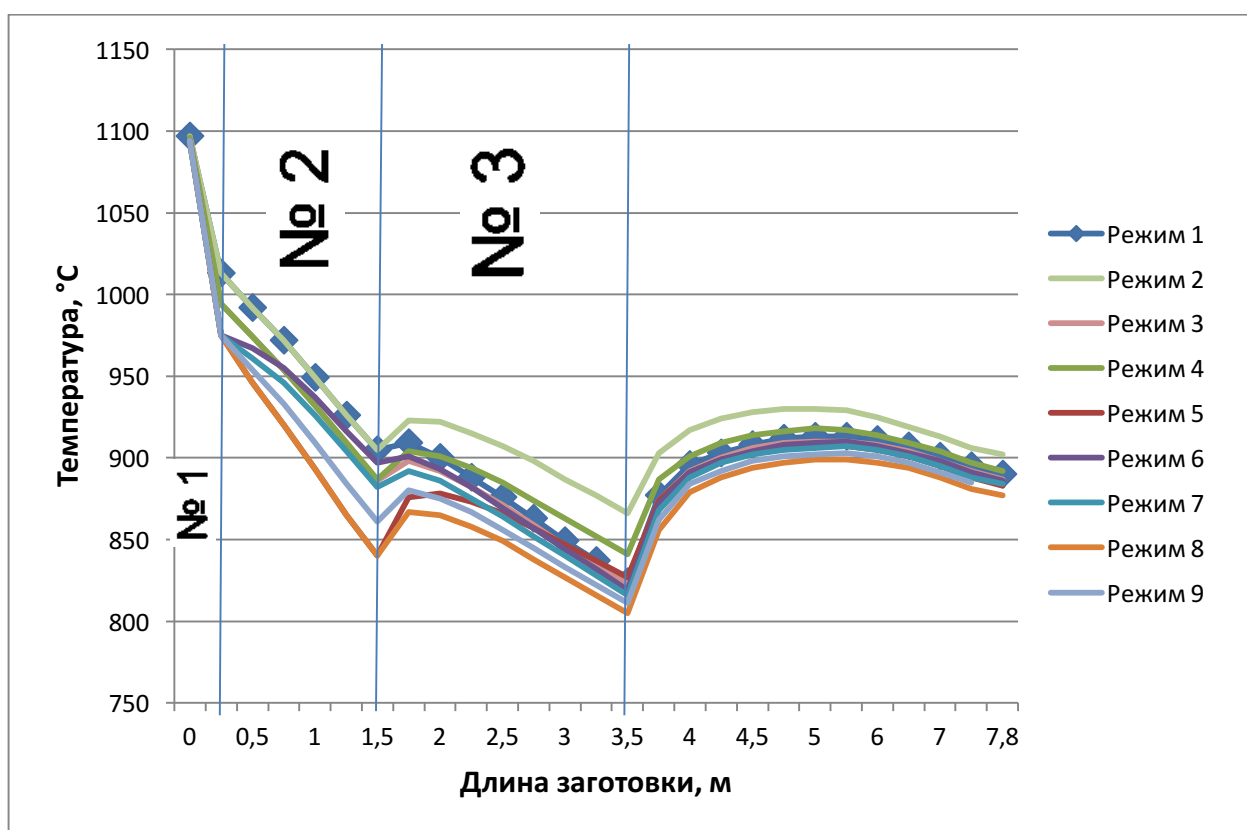


Рис. 28– График изменения температуры по длине заготовки при скорости разливки $v=0,65$ м/мин в зависимости от интенсивности теплоотвода

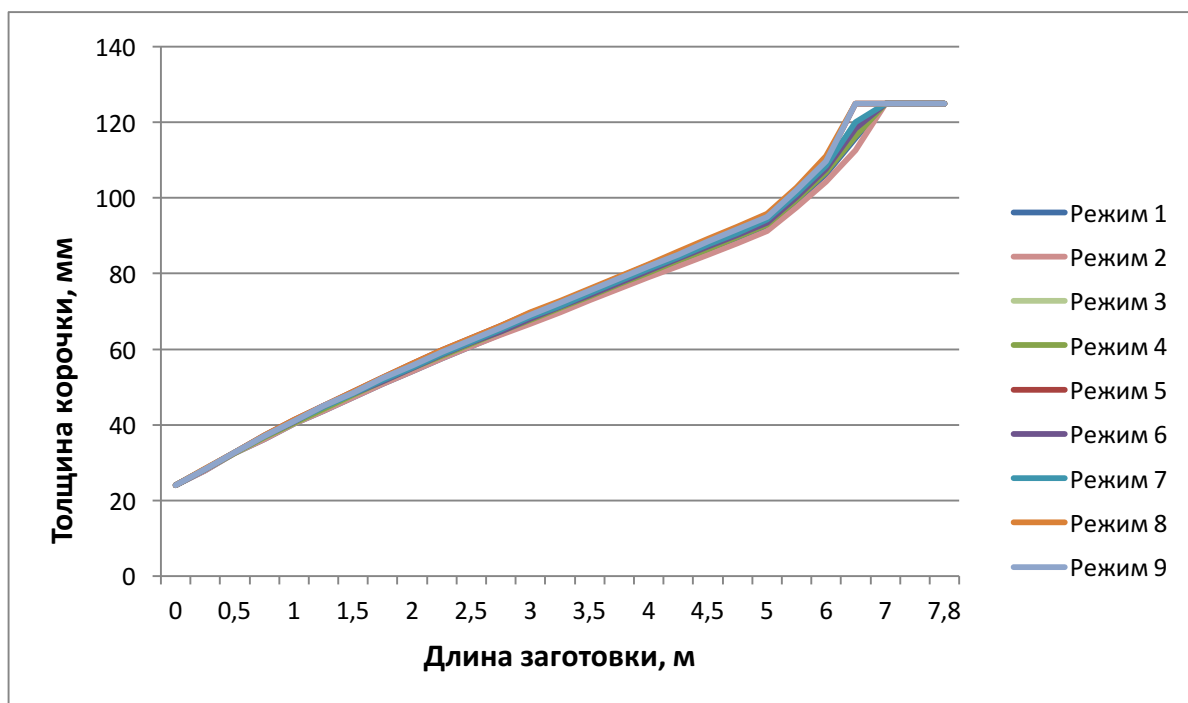


Рис. 29 – График изменения толщины затвердевшего металла по длине заготовки при скорости разливки $v=0,65$ м/мин в зависимости от интенсивности теплоотвода

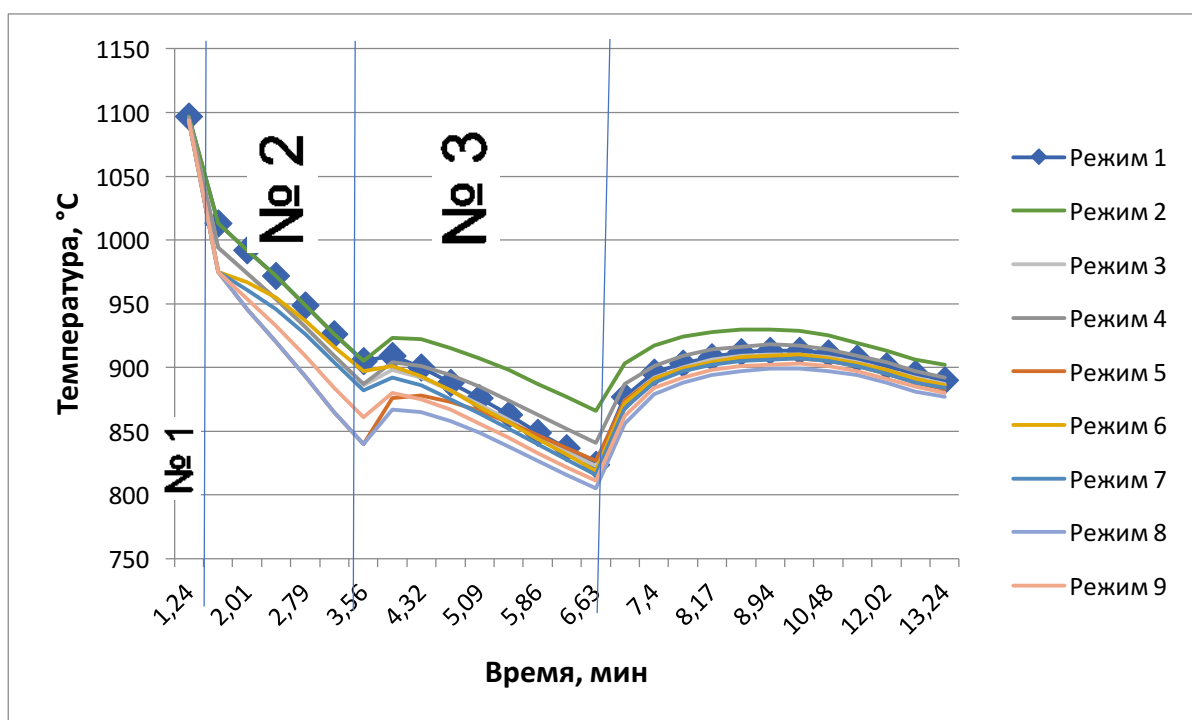


Рис. 30 – График изменения температуры во времени при скорости разливки $v=0,65$ м/мин в зависимости от интенсивности теплоотвода

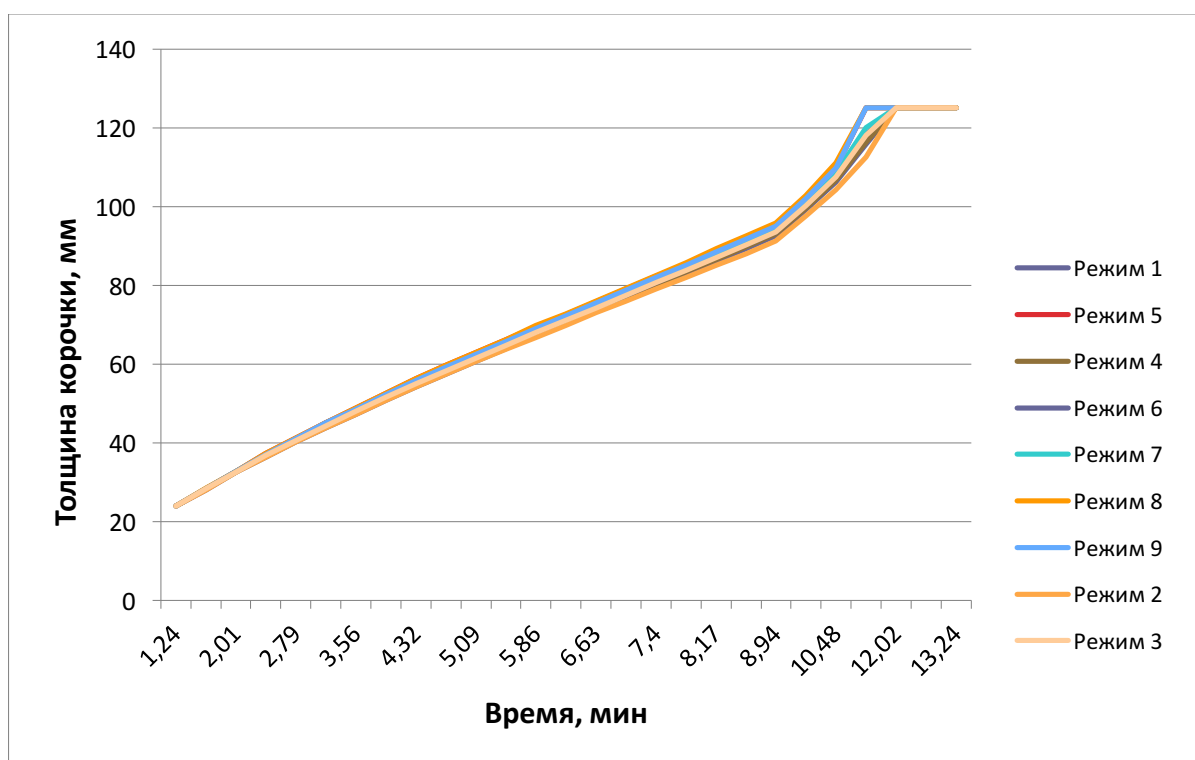


Рис. 31 – График изменения толщины затвердевшего металла во времени при скорости разливки $v=0,65$ м/мин в зависимости от интенсивности теплоотвода

Стоит отметить, что на рисунках 28 и 30 наблюдаются области резкого изменения температуры в некоторых режимах. Обусловлены они тем, что в этих режимах происходит изменение интенсивности теплоотвода при переходе между секциями зоны вторичного охлаждения. Между тем, как следует из рисунков 29 и 31, величины интенсивности теплоотдачи в рамках исследованных тепловых режимов практически не оказывают влияния на скорость образования твёрдой корочки металла.

Также было рассчитано количество нарастающей окалины на поверхности непрерывнолитой заготовки за время ее затвердевания.

Таблица 10 – Данные исследований нарастания слоя окалины на поверхности затвердевающей заготовки в процессе непрерывной разливки стали

Длина заготовки, м	Время, мин	Температура поверхности заготовки, °C	Толщина слоя окалины, мм	Расчётный коэффициент KS
0	1,24	1097	0	503000
0,5	2,01	992	0,079	503000
1,25	3,1	926	0,1	503000
2,75	5,49	863	0,12	503000
3,55	6,7	822	0,124	503000
4,5	8,15	908	0,128	210000
7,8	13,24	890	0,135	105075

Здесь KS – коэффициент, отражающий состояние окружающей среды и определяемый опытным путем [85]. Его введение необходимо для точных расчетов количества появляющейся окалины. Расчётные точки выбирались

таким образом, чтобы средняя температура поверхности на данном участке была приблизительно одинаковой.

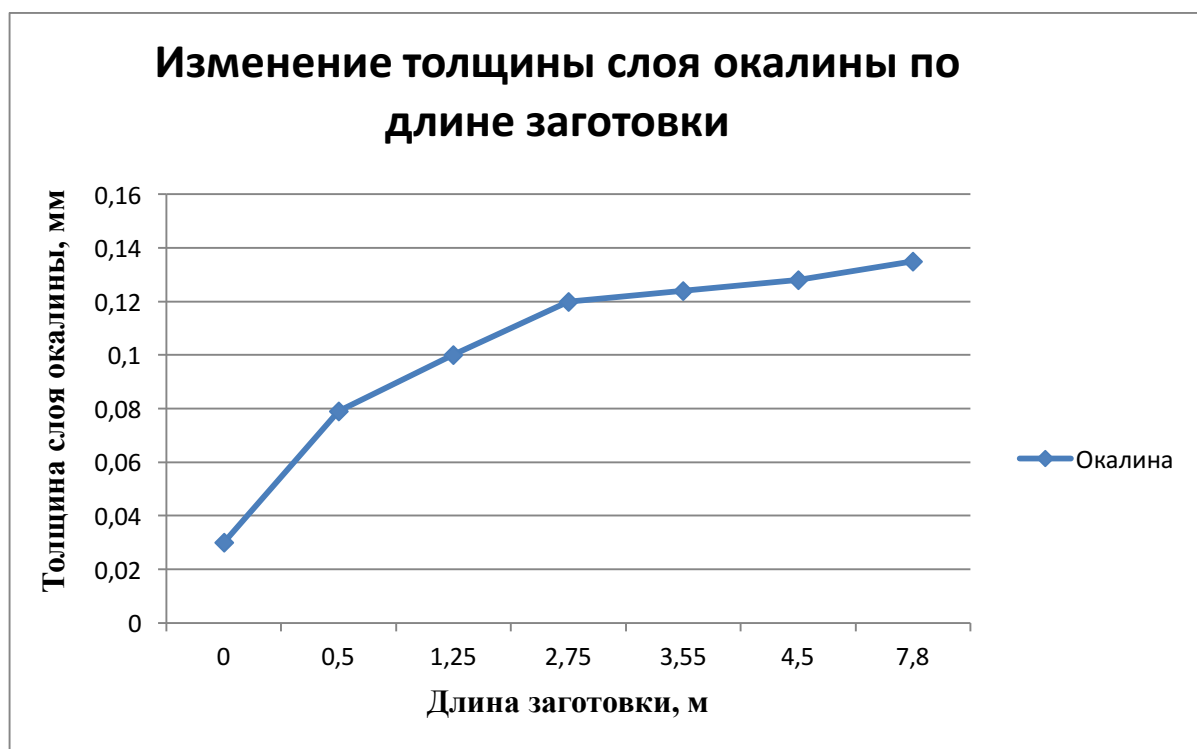


Рис. 32 – Изменение толщины слоя окалины на поверхности затвердевшего металла в процессе затвердевания заготовки

Из таблицы 10 и рисунка 32 видно, что слой окалины, образовавшийся на поверхности затвердевающей заготовки за время разливки, составляет примерно 0,14 мм. Такой тонкий слой окалины практически не будет оказывать влияния на процесс охлаждения заготовки. Но в силу того, что при появлении трещин на поверхности металла на месте трещины быстро нарастает небольшой слой окалины, то актуальным становится решение вопроса потерь металла с угаром. Если в процессе затвердевания заготовки на её поверхности будет образовываться большое количество различных наружных трещин, то и суммарные потери металла будут существенными. Соответственно, для минимизации данных потерь, необходимо избежать появления трещин на поверхности металла путём организации рационального режима охлаждения.

Согласно рисункам 28, 29, 30, 31 и таблицам 9 и 10 видно, что при реализации режимов с коэффициентом теплоотдачи $500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ 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 температур может привести к образованию трещин в затвердевшей области заготовки в силу 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 секции ЗВО, наиболее рациональным стоит считать режим, характеризуемый коэффициентом теплоотдачи $400 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ в первой секции ЗВО, так как при данном режиме значительно сокращается перепад температур по длине в данной секции. Кроме того, с целью уменьшения величин термических напряжений в затвердевающем металле интенсивность теплоотдачи во второй и третьей секциях ЗВО должна соответствовать коэффициентам теплоотдачи $\alpha=300 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ и $\alpha=225 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Такая интенсивность теплоотвода позволит избежать разогрева на поверхности заготовки при переходе между секциями зон вторичного охлаждения, при этом 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.

3.3 Апробация математической модели и проверка расчётных данных на соответствие с практическими данными

Для проверки разработанной математической модели и подтверждения адекватности данных, полученных по ней в ходе расчётов температурных полей затвердевающей непрерывнолитой заготовки, было проведено сравнение полученных расчётных данных с экспериментальными, которые приводятся в исследованиях таких учёных, как Урбанович Л.И., Генкин В.Я., Есаулов А.В., Лукин С.В., Мираслимов В.М. и других [7, 11, 13]. Для адаптации модели также использовались данные ВНИИМТ, полученные в экспериментах по измерению температур поверхности непрерывнолитой заготовки при помощи замороженных термопар на Ново-Липецком металлургическом комбинате [86].

Сравнение проводится с учётом термической массивности тела, которая определяется значением числа Био (Bi). Необходимо отметить, что число Био является мерой термической массивности тела. При значениях $Bi < 0,5$, тело считается термически тонким, а при $Bi > 0,5$ – термически массивным.

Число Био определяется по формуле:

$$Bi = \alpha \cdot \delta / \lambda, \quad (38)$$

где α – коэффициент теплоотдачи на поверхности заготовки, Вт/(м²·К);

δ – характерный размер заготовки, м;

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

Сравнение проводилось с экспериментальными значениями определения температурного поля на поверхности заготовок диаметром 360 мм, которые приводятся в работах Генкина В.Я. и Есаулова А.Т. [7], и со значениями для широкой грани прямоугольных заготовок, по приведённым данным из книги В.М. Мираслимова и В.А. Емельянова [13]. Данные заготовки при в зоне вторичного охлаждения при коэффициентах теплоотдачи от 100 до 500

$\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ можно считать термически массивными телами, так как значения числа Био для них будет больше 0,5.

Для заготовки диаметром 360 мм при коэффициентах теплоотдачи от 100 до $500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ число Bi будет изменяться в пределах от 0,6 до 2,4:

$$Bi_1 = 100 \cdot 0,18 / 30 = 0,6;$$

$$Bi_2 = 400 \cdot 0,18 / 30 = 2,4.$$

Здесь 0,18 – характерный размер заготовки, равный его радиусу, так как заготовка орошается водовоздушной смесью по всему периметру, $30 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ – средний коэффициент теплопроводности стали.

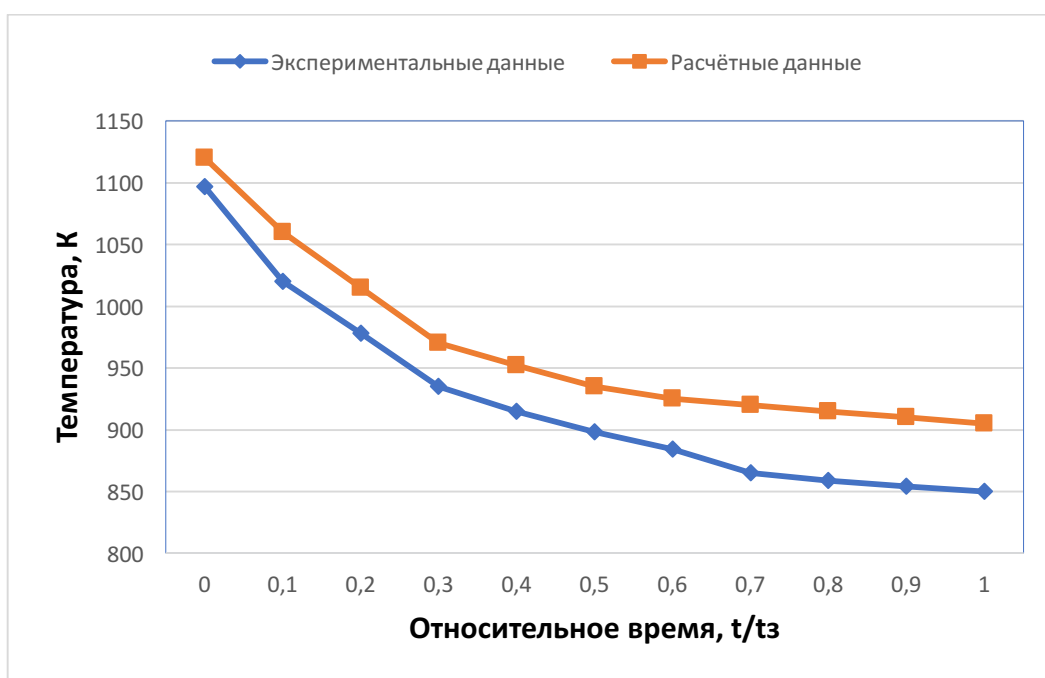
Для заготовки диаметром 250 мм при коэффициентах теплоотдачи от 100 до $500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ число Bi будет изменяться в пределах от 0,42 до 1,67:

$$Bi_1 = 100 \cdot 0,125 / 30 = 0,42;$$

$$Bi_2 = 400 \cdot 0,125 / 30 = 1,67.$$

Здесь 0,125 – характерный размер заготовки, равный его радиусу, так как заготовка орошается водовоздушной смесью по всему периметру, $30 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ – средний коэффициент теплопроводности стали.

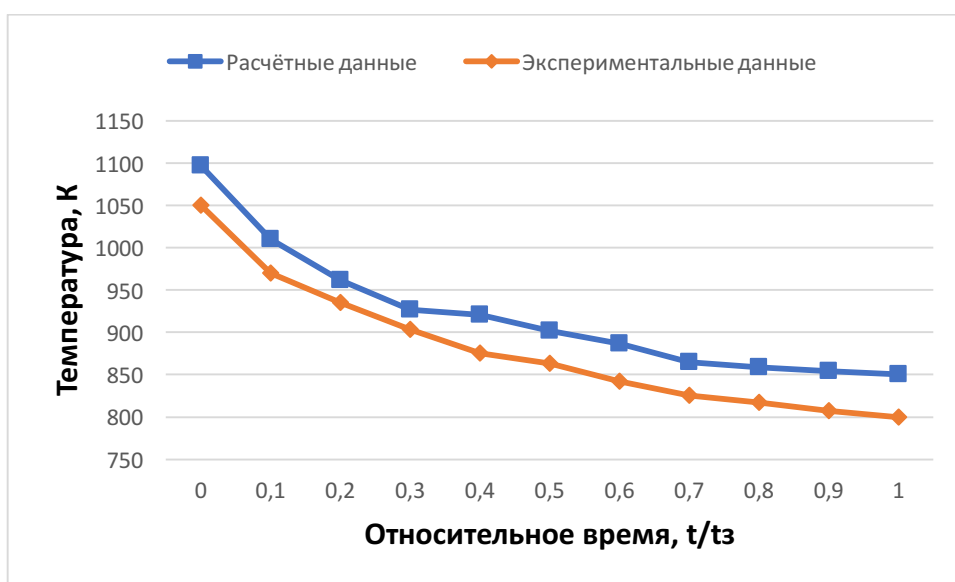
Из рисунка 33 видно, что в процессе затвердевания наблюдается расхождение между расчётными и экспериментальными данными, которое в своём максимуме не превышает 55 К, а среднее расхождение составляет не более 45 К, что соответствует погрешности около 5%. Это позволяет судить о достаточной для инженерных расчётов точности разработанной модели. Также стоит отметить, что данные, полученные по модели, меньше, чем экспериментальные.



t – текущее время, с; t_3 – полное время затвердевания заготовки, с; t/t_3 – относительное время

Рис. 33 – Сравнение расчётных данных по модели с экспериментальными для круглой заготовки диаметром 360 мм

Из рисунка 34 также видно расхождение между расчётными и экспериментальными данными, которое постепенно увеличивается, но в максимуме не превышает 60 градусов, что соответствует погрешности около 6%. Такая точность является допустимой для инженерных расчётов. Стоит отметить, что на рисунке 34 представлены экспериментальные данные для широкой грани заготовки прямоугольного сечения, процесс затвердевания с тепловой точки зрения аналогичен затвердеванию цилиндрических непрерывнолитых заготовок. Но в силу сравнения с прямоугольными заготовками, расхождение расчётных данных с экспериментальными больше, чем при сравнении с круглыми заготовками.



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

Рис. 34 – Сравнение расчётных данных по модели с экспериментальными для прямоугольной заготовки (экспериментальные данные брались равными температуре поверхности широкой грани)

Кроме того, было проведено сравнение расчётных и экспериментальных данных протяжённости жидкометаллической лунки при скоростях разлива 0,7 и 0,65 м/мин. Расчётные данные сравнивались с экспериментальными, представленными на рис. 35 [13]. Видно, что полученные по модели данные близки к экспериментальным. Протяжённость жидкометаллической лунки при скорости разлива 0,7 м/мин согласно расчётной модели равняется 7,5 м, что было отмечено выше. Согласно экспериментальным данным протяжённость жидкометаллической лунки составляет около 8 метров. При скорости разлива 0,65 м/мин согласно проведённым расчётам протяжённость жидкометаллической лунки будет составлять 6,6 м. А согласно экспериментальным данным она будет равняться примерно 7 метров, что также видно из рис. 35. Погрешность вычислений для обеих скоростей разлива составляет примерно 6%, что соответствует требованиям, предъявляемым к инженерным расчётам и позволяет говорить о допустимости использования

разработанной математической модели охлаждения и затвердевания для определения основных технологических параметров при непрерывной разливке круглых заготовок.

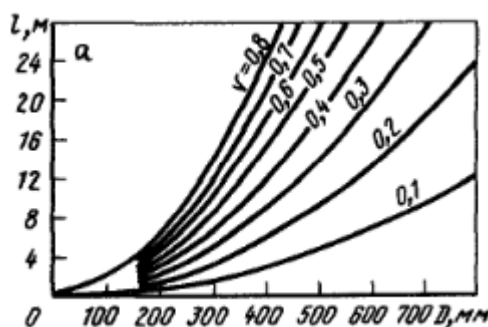


Рис. 35 – Зависимость протяжённости жидкой фазы l от скорости разливки v для заготовок различного диаметра D

3.4 Выводы

1. Проведены необходимые исследования режимов охлаждения в кристаллизаторе с целью проверки разработанной математической модели и получения исходных данных для дальнейших исследований в зоне вторичного охлаждения.
2. Проведено исследование различных режимов охлаждения непрерывнолитых заготовок в зоне вторичного охлаждения с целью выбора рационального режима непрерывной разливки для коррозионностойких марок сталей.
3. Обоснован рациональный режим охлаждения непрерывнолитых заготовок круглого сечения из коррозионностойких марок сталей, который характеризуется скоростью разливки $v=0,65$ м /мин и интенсивностями теплоотвода 400, 300 и 225 Вт/(м²·К) в первой, второй и третьей секциях зоны вторичного охлаждения соответственно.
4. Данный режим позволяет обеспечить практически монотонное снижение температуры по длине затвердевающей заготовки, что, в свою

очередь, уменьшит вероятность появления внутренних радиальных и поверхностных трещин, а также образующийся слой окалины на поверхности металла.

5. При реализации выбранного рационального режима охлаждения в первой секции зоны вторичного охлаждения снижается перепад температур, и, как следствие, возникающие термические напряжения, что позволит избежать поверхностных трещин и других дефектов непрерывнолитой заготовки.

6. Проведено исследование количества нарастающей окалины на поверхности металла в процессе непрерывной разливки заготовок круглого сечения.

ГЛАВА 4. ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ОХЛАЖДЕНИЯ НА ВОЗНИКАЮЩИЕ ТЕРМИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКЕ СТАЛИ

4.1 Термические напряжения, возникающие при однородных и неоднородных граничных условиях по длине заготовки без учета перетоков теплоты

Как отмечалось ранее, процесс затвердевания заготовки невозможно рассматривать без учёта качества получаемого литого металла. Помимо скорости разливки и интенсивности охлаждения, необходимо учитывать термические напряжения, возникающие в охлаждаемой заготовке.

На практике тепловое состояние затвердевающей непрерывнолитой заготовки определяется не только интенсивностью её охлаждения (что учитывается граничными условиями при постановке задачи охлаждения), но и степенью неоднородности граничных условий по длине заготовки [80, 81]. Указанная неоднородность возникает при неправильной настройке системы охлаждения заготовки, возникновении возмущений, связанных с изменением расходов подаваемых на охлаждение водовоздушной смеси, при переходе между секциями зоны вторичного охлаждения. Неоднородность граничных условий может вызывать термические напряжения не только в радиальном направлении, но и в осевом, то есть по длине заготовки.

Для анализа влияния неоднородности граничных условий на охлаждение заготовки была разработана математическая модель [83]. В основе модели лежит дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности в цилиндрических координатах. Неоднородность граничных условий задавалась графиком изменения распределения коэффициентов конвективной теплоотдачи по длине заготовки. В ходе исследований определялись температурные поля по длине заготовки в процессе непрерывной разливки стали. Затем по известным

формулам рассчитывались градиенты температур в каждом сечении и термические напряжения, возникающие в затвердевающем металле, с шагом 0,25 м.

Изменение градиентов по длине в каждом сечении определялось по формуле:

$$\text{grad}T = (T_{\text{внутр}} - T_{\text{пов}})/L, \quad (39)$$

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, м.

Термические напряжения, возникающие в затвердевающей цилиндрической заготовке, определялись по формуле [85]:

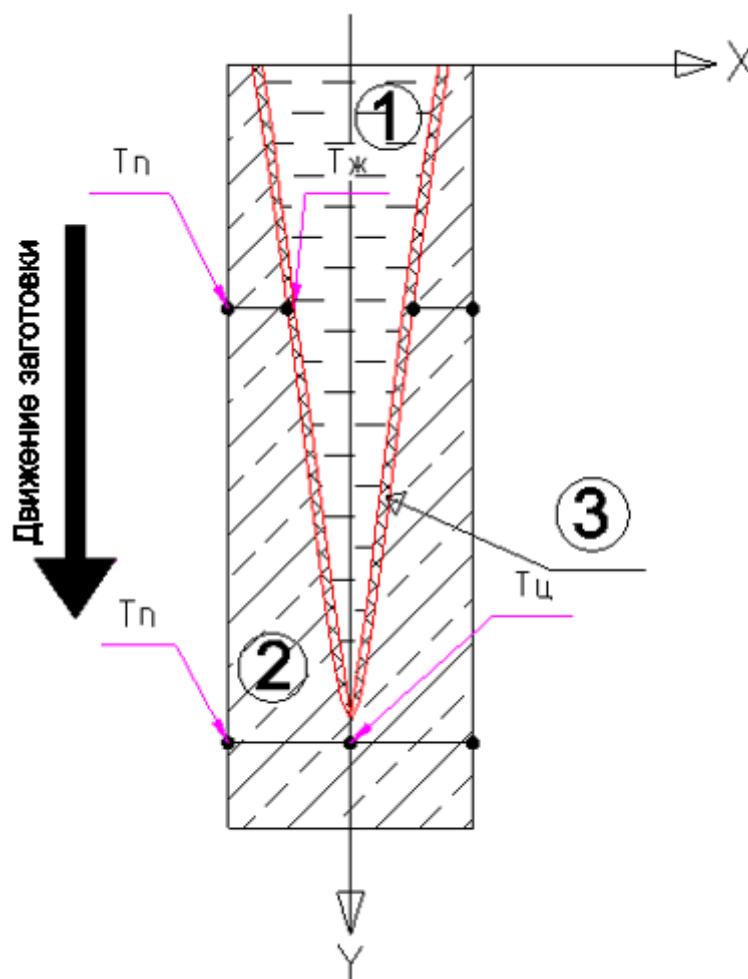
$$\sigma = (\beta \cdot E / 2) \cdot (1 - \nu) \cdot (T_{\text{внутр}} - T_{\text{пов}}) \cdot 10^{-6}, \text{ МПа} \quad (40)$$

где β – коэффициент линейного удлинения стали, °С⁻¹;

E – модуль упругости, Па;

ν – отношение Пуассона (для стали равно 0,3).

В таблице 11 представлены характеристики исследованных режимов охлаждения, которые определяют различную степень неоднородности граничных условий по длине заготовки, например: недостаток количества охлаждаемой среды, изменения количества подаваемой охлаждающей смеси по длине заготовки и т.д. Во всех режимах на воздухе предполагается одинаковая интенсивность охлаждения по длине заготовки, характеризуемая коэффициентом теплоотдачи $\alpha = 30 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. При расчётах принималось, что имеется симметрия граничных условий по длине окружности заготовки.



1 – область жидкой фазы, 2 – затвердевшая область, 3 – область двухфазного состояния

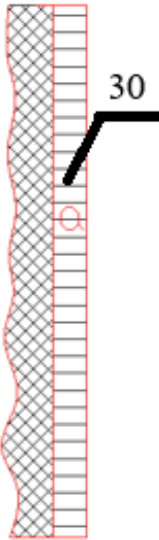
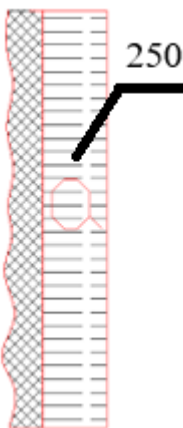
Рис. 36 – Схема жидкометаллической лунки при непрерывной разливке

В ходе исследований проводился анализ зависимости градиентов температур в сечениях по длине от интенсивности охлаждения заготовки и возникающих термических напряжений, появляющихся в заготовке по мере её охлаждения. Исследования проводились для выбранных режимов зоны вторичного охлаждения и воздуха [87].

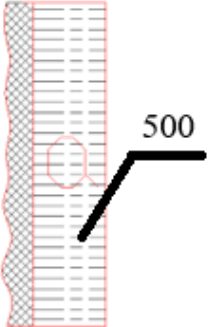
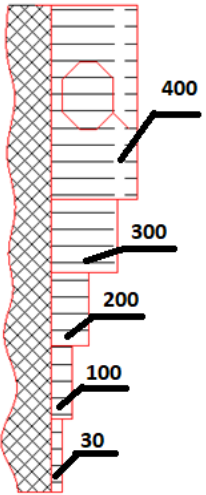
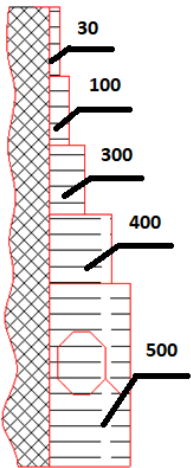
Все исследования проводились с целью найти те условия охлаждения, при которых максимальные термические напряжения, возникающие в заготовке $\sigma_{\max}$ будут меньше допустимых термических напряжений $\sigma_{\text{доп}}$ для коррозионностойких марок сталей. Это важно, так как в случае превышения

допустимых термических напряжений велика вероятность появления наружных и внутренних трещин, что приведёт к браку получаемой заготовки.

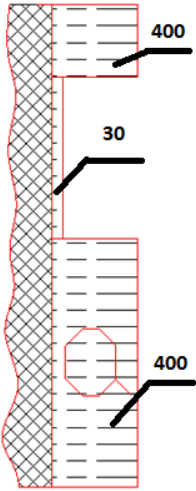
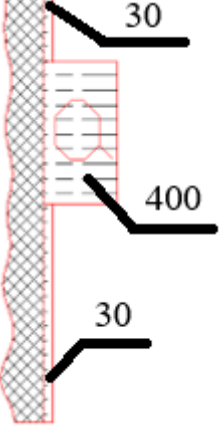
Таблица 11 – Исследуемые режимы охлаждения заготовки в зоне вторичного охлаждения (ЗВО) и на воздухе

Режим	Схема распределения интенсивности охлаждения. Выносками обозначены величины коэффициентов теплоотдачи α , Вт/(м ² ·К)	Описание режима
1	2	3
I		Равномерное охлаждение заготовки по всей длине с минимальной интенсивностью охлаждения на воздухе
II		Равномерное охлаждение заготовки по всей длине в ЗВО

Продолжение таблицы 11

1	2	3
III		Равномерное охлаждение заготовки по всей длине в ЗВО
IV		Постепенное снижение интенсивности охлаждения заготовки по всей длине
V		Постепенное увеличение интенсивности охлаждения заготовки по всей длине

Продолжение таблицы 11

1	2	3
VI		Резкое снижение интенсивности охлаждения заготовки на локальном участке в ЗВО
VII		Резкое увеличение интенсивности охлаждения заготовки на локальном участке в ЗВО

Необходимо отметить, что при прогнозировании разрушения стали от температурных напряжений, необходимо использовать временное сопротивление σ_v в качестве допустимого $\sigma_{доп}$. Согласно данным [88, 89] $\sigma_{доп}$ принимают равным $0,9\sigma_v$. Для коррозионностойких марок сталей σ_v примерно равняется 1010 МПа [88]. Следовательно, $\sigma_{доп} = 0,9 \cdot 1010 \text{ МПа} = 909 \text{ МПа}$.

На рисунках 37-43 показано изменение градиентов и термических напряжений, возникающих при охлаждении заготовки по её длине.

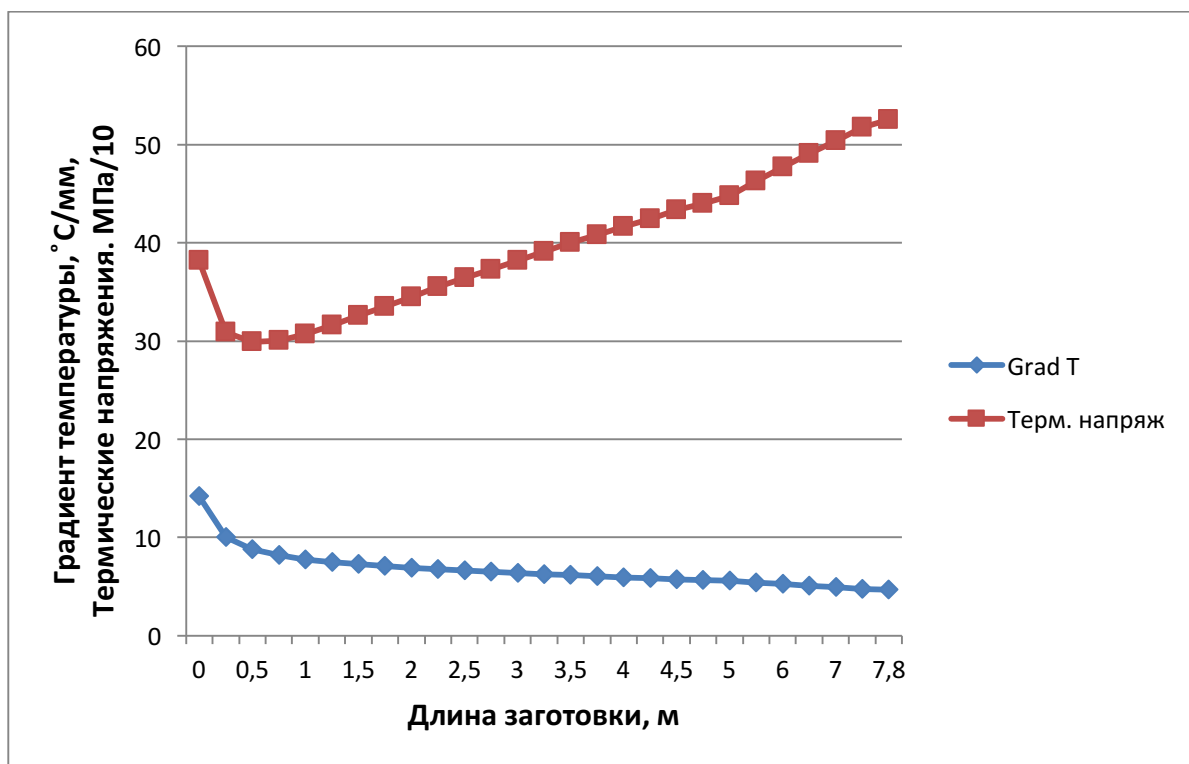


Рис. 37 – График изменения градиентов температур и термических напряжений в режиме I

Как видно из рисунка 37, градиенты температур и величины термических напряжений при коэффициенте теплоотдачи $\alpha=30 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ на поверхности затвердевающей заготовки получаются значительно ниже допустимых. Это объясняется тем, что при таком режиме интенсивность отвода теплоты от поверхности заготовки будет минимальной. Благодаря этому заготовка будет охлаждаться гораздо медленнее, чем при более интенсивном охлаждении. Это приведёт к уменьшению градиентов температур по длине заготовки, и, как следствие, к существенному уменьшению производительности МНЛЗ.

Как видно из рис. 38, при коэффициенте теплоотдачи $\alpha=250 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ по длине ЗВО термические напряжения постепенно увеличиваются, достигая максимума на выходе из зоны вторичного охлаждения. В зоне воздушного естественного охлаждения происходит постепенное снижение термических напряжений, что объясняется уменьшением разностей температур на границе раздела фаз и поверхностью заготовки.

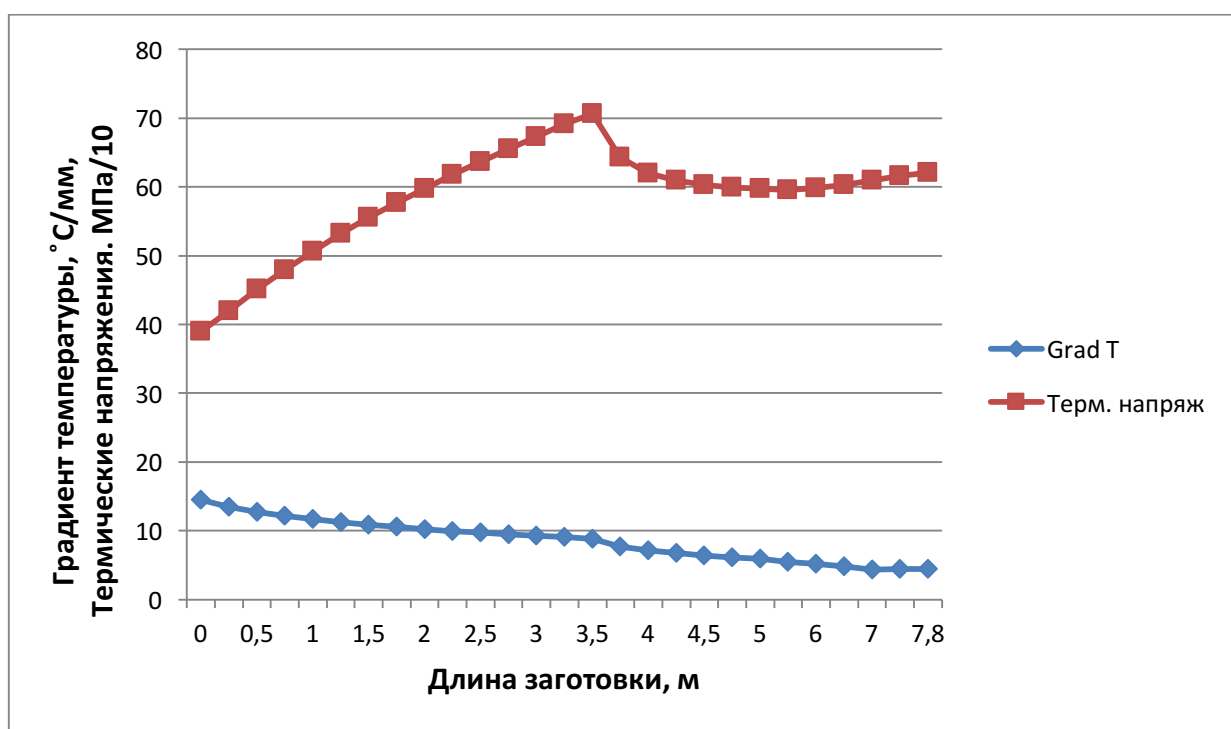


Рис. 38 – График изменения градиентов температур и термических напряжений в режиме II

Из графика на рис. 39 видно, что при коэффициенте теплоотдачи $\alpha=500$ Вт/(м²·К) также происходит постепенное увеличение термических напряжений, что объясняется увеличением перепада температур по сечению в затвердевшем металле. Причём, термические напряжения при таком режиме будут больше, чем в режимах I и II, что объясняется большей интенсивностью отвода тепла от затвердевшего металла.

Из рис. 40 видно, что при постепенном снижении интенсивности теплоотдачи по длине заготовки термические напряжения тоже постепенно снижаются, несмотря на небольшой рост в начале. Это объясняется тем, что при уменьшении значений коэффициентов теплоотдачи разность температур по сечению тоже становится меньше и, следовательно, термические напряжения падают.

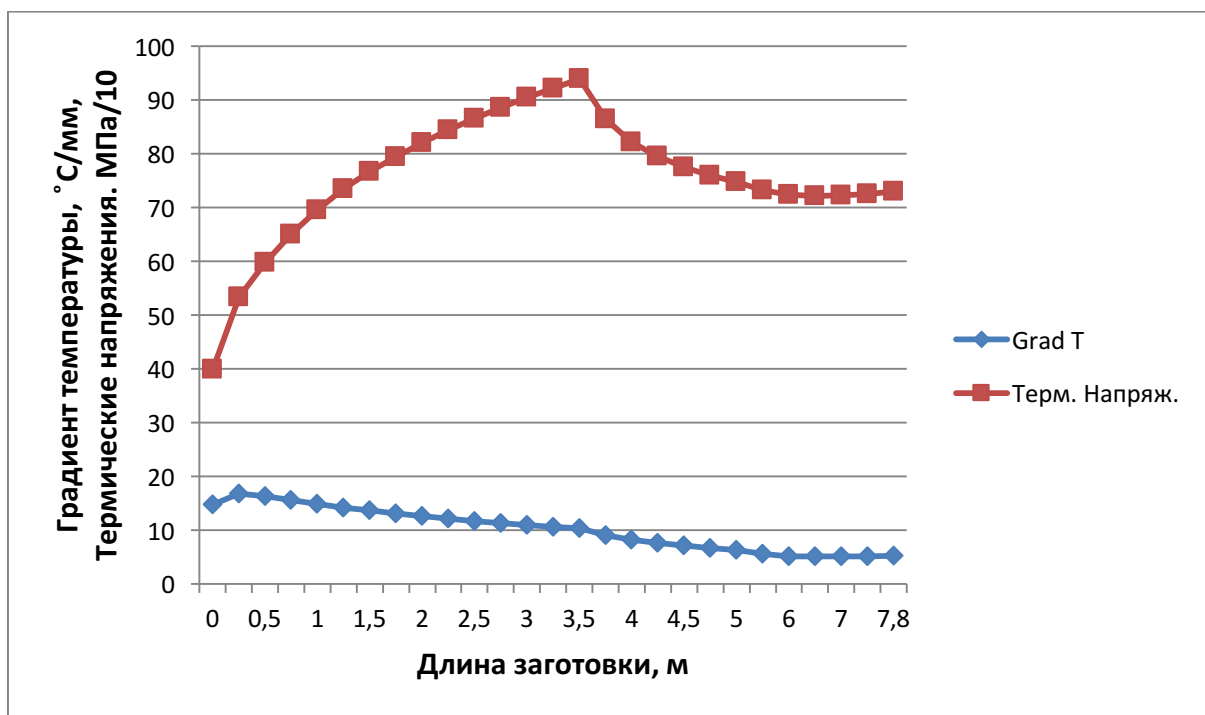


Рис. 39 – График изменения градиентов температур и термических напряжений в режиме III

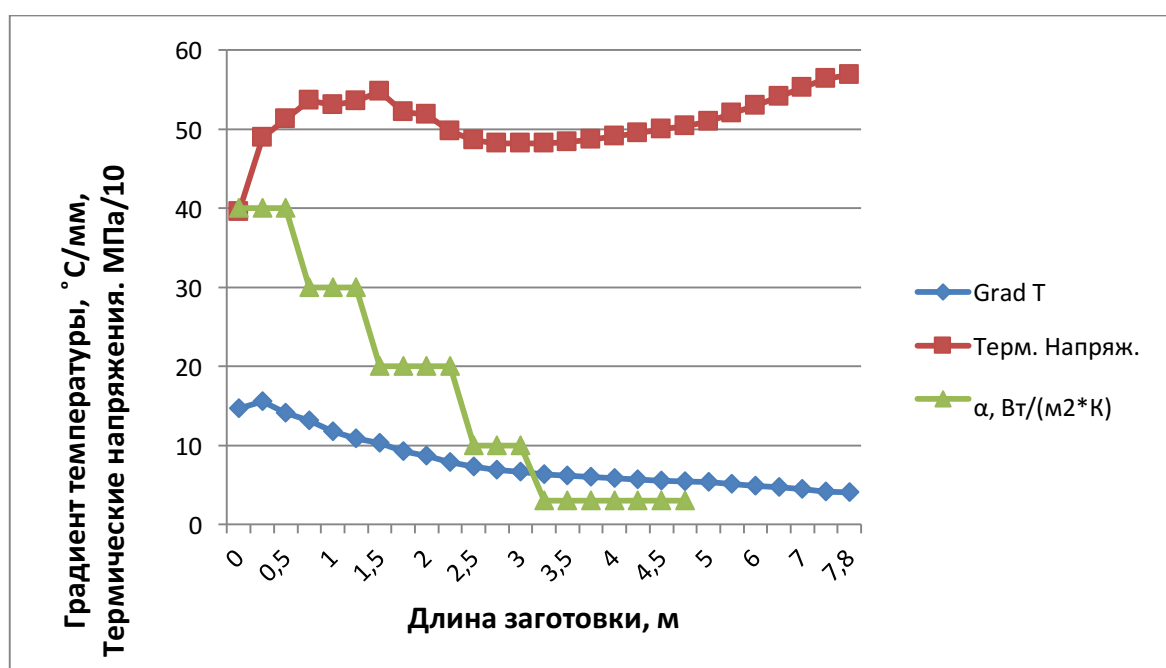


Рис. 40 – График изменения градиентов температур и термических напряжений при постепенном снижении коэффициентов теплоотдачи по всей длине ЗВО (режим IV)

На рисунке 41 постепенный рост термических напряжений по длине заготовки также объясняется постепенным ростом коэффициентов теплоотдачи. При выходе на воздух снова наблюдается снижение величин термических напряжений вместе со снижением интенсивности теплоотдачи.

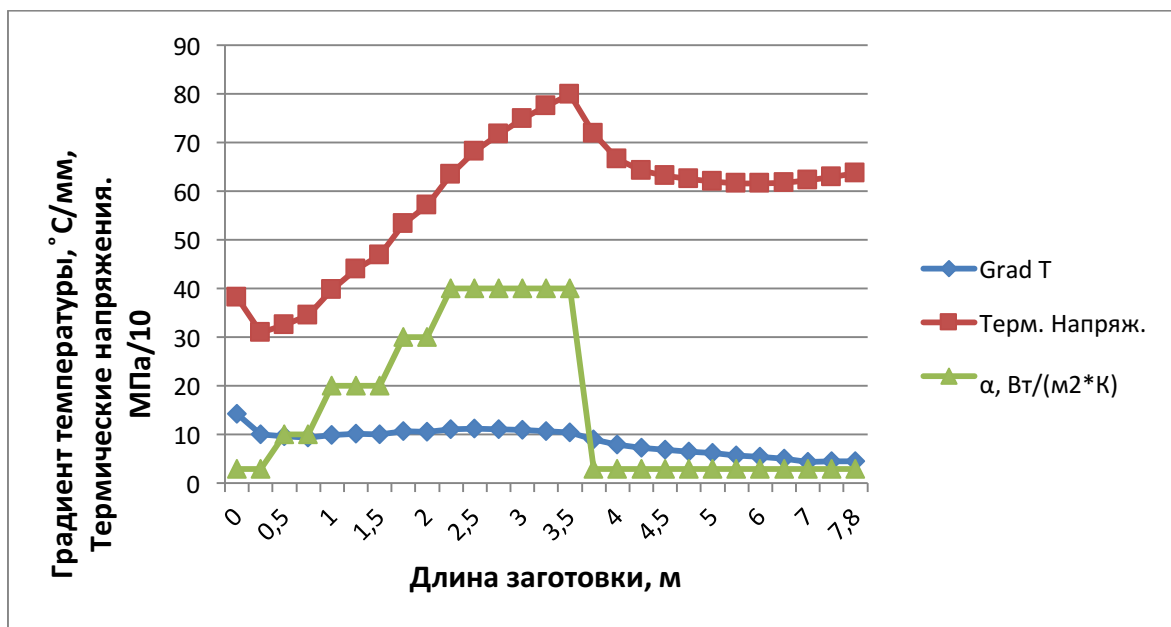


Рис. 41 – График изменения градиентов температур и термических напряжений при постепенном увеличении коэффициентов теплоотдачи по всей длине ЗВО (режим V)

При резком повышении интенсивности охлаждения затвердевающей заготовки на локальном участке в этой области наблюдается снижение величин термических напряжений. При возвращении коэффициентов теплоотдачи на прежний уровень термические напряжения также начинают расти, что связано с увеличением перепада температур в сечениях.

При резком увеличении интенсивности теплоотдачи на локальном участке наблюдается увеличение термических напряжений, что полностью согласуется с предыдущими результатами исследований.

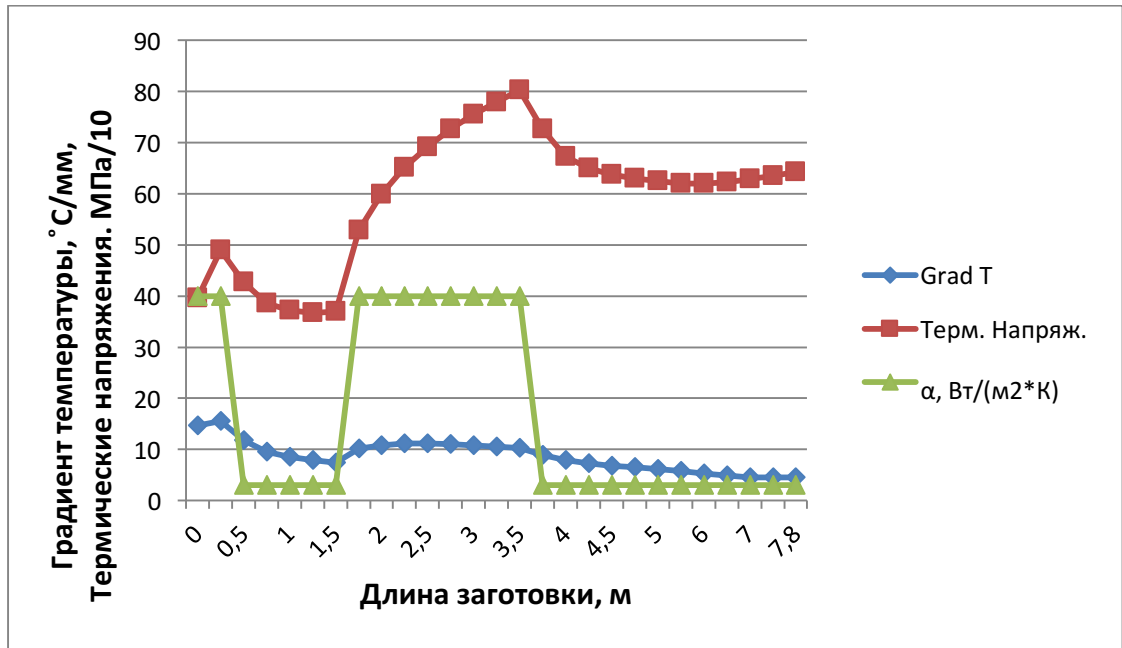


Рис.42 – График изменения градиентов температур и термических напряжений при резком снижении коэффициента теплоотдачи в ЗВО (режим VI)

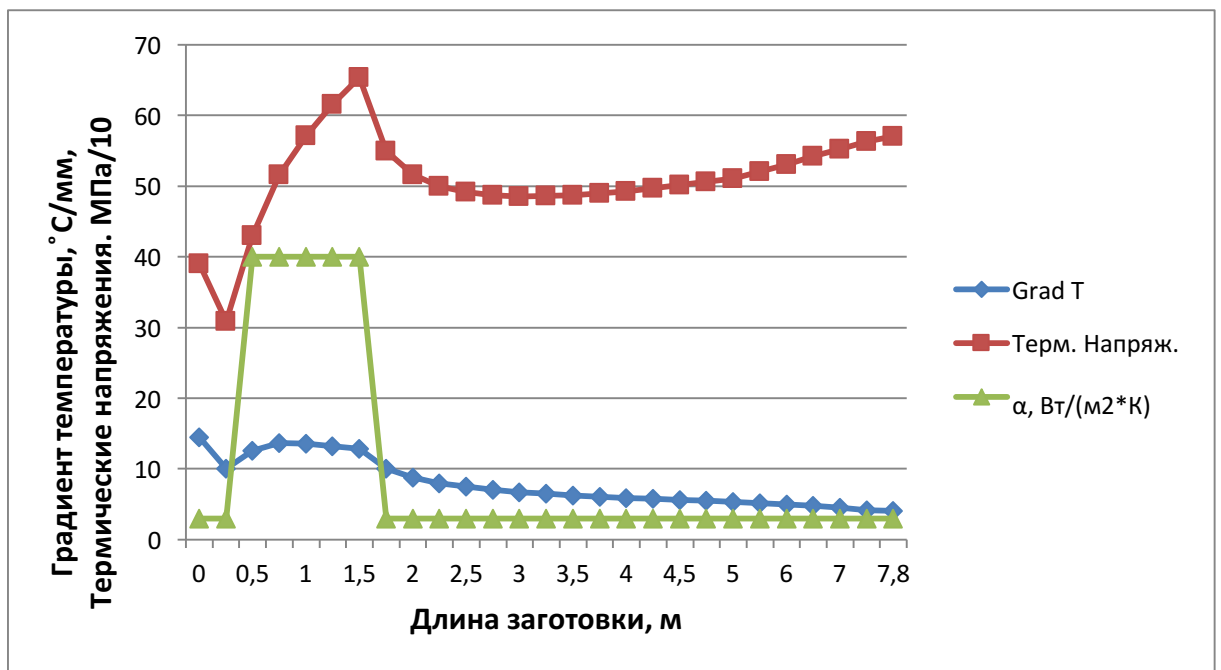


Рис. 43 – График изменения градиентов температур и термических напряжений при резком увеличении коэффициента теплоотдачи в ЗВО (режим VII)

Из анализа результатов исследований следует, что наименьшие термические напряжения наблюдаются в режиме I. Но при этом, наблюдается их рост при неизменной интенсивности теплоотдачи. Увеличение термических напряжений наблюдается по всей ЗВО также в режимах II и III. Более того, как видно из рисунка 39, при коэффициенте теплоотдачи $\alpha=500 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ термические напряжения достигают значений выше допустимых $\sigma_{\text{доп}}$ для коррозионностойких марок сталей, что с большой долей вероятности может привести к внутренним и наружным трещинам.

В случаях с режимами VI и VII, когда наблюдается локальное резкое снижение или увеличение интенсивности охлаждения заготовки видно, что аналогично реагируют и термические напряжения. При резком снижении интенсивности охлаждения в следствие уменьшения перепада температур по сечению значения термических напряжений также падают. И, наоборот, при резком увеличении интенсивности охлаждения, как в режиме VII, наблюдается рост термических напряжений. Резкое изменение термических напряжений при температурах ведения процесса непрерывной разливки стали также может привести к появлению наружных и внутренних дефектов.

В режиме V значения термических напряжений не превышают допустимых, но наблюдается существенная неоднородность распределения термических напряжений по длине заготовки, что также может привести к появлению дефектов в заготовке.

Наиболее рациональным с точки зрения допустимых термических напряжений можно считать режим IV. Объясняется это тем, что в данном режиме в силу высокой интенсивности теплоотдачи в начале ($\alpha=400 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$) термические напряжения растут, но с постепенным снижением интенсивности теплоотдачи практически монотонно снижается и величина термических напряжений, не превышая при этом допустимых значений $\sigma_{\text{доп}}$. При достижении минимальных значений интенсивности теплоотдачи видно, что термические напряжения снова начинают расти, что, впрочем, свойственно для всех 7 режимов. Объясняется это тем, что в зоне выхода металла из ЗВО на

воздух внутри, где заготовка полностью затвердела, её температура в центре также начинает уменьшаться, но медленнее, чем на поверхности. Поэтому начинают увеличиваться градиенты температур. Это в свою очередь ограничивает время охлаждения заготовки до того момента, пока не будут достигнуты допустимые термические напряжения.

Из проведённого анализа видна корреляция между неоднородностью граничных условий охлаждения заготовки и величинами термических напряжений, возникающих в радиальном направлении: чем выше интенсивность охлаждения, тем больше термические напряжения. Это позволяет управлять режимами охлаждения и прогнозировать вероятность появления наружных и внутренних трещин в отливаемых заготовках в зависимости от количества подаваемой охлаждающей среды.

4.2 Термические напряжения, возникающие при неоднородных граничных условиях по периметру заготовки без учета перетоков теплоты

Одной из причин возникновения термических напряжений в заготовке является ее асимметричное охлаждение по периметру. Такая несимметричность теплоотвода может возникнуть из-за постепенного ухудшения работы водовоздушных форсунок, по причине выхода из строя охлаждающих устройств или из-за ошибок в организации процесса охлаждения заготовок. Для изучения влияния несимметричности нагрева по длине окружности были проведены соответствующие исследования при различных интенсивностях теплоотвода по периметру заготовки.

Предполагается, что несимметричность охлаждения заготовки наблюдается только по её периметру. В продольном направлении интенсивность охлаждения сохраняется постоянной в рамках зон охлаждения. Внутренние перетоки теплоты между зонами охлаждения отсутствуют. Длины зон охлаждения по окружности равны между собой и кратны количеству зон

охлаждения. Рассматриваются термические напряжения, возникающие между центром заготовки и её поверхностью.

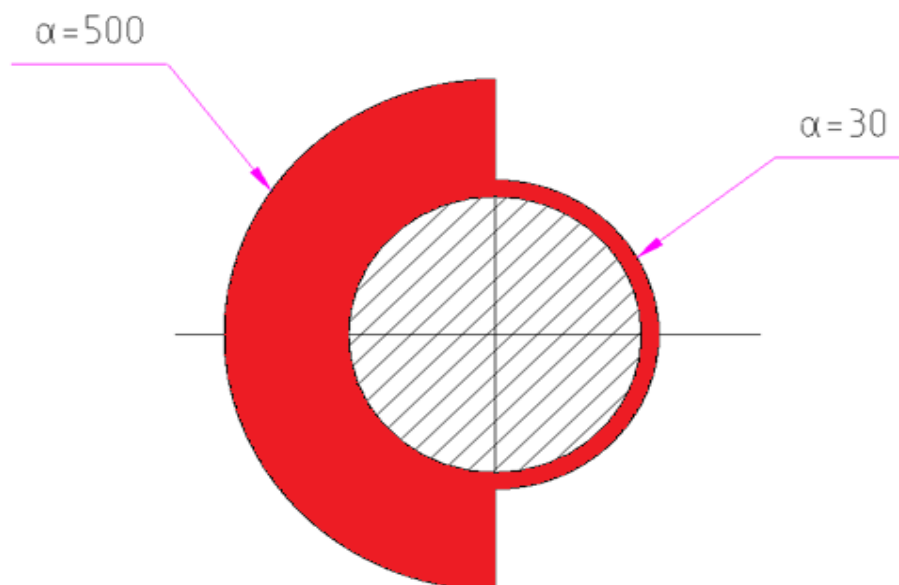


Рис. 44 – Пример распределения интенсивности охлаждения для двух секторов по периметру заготовки

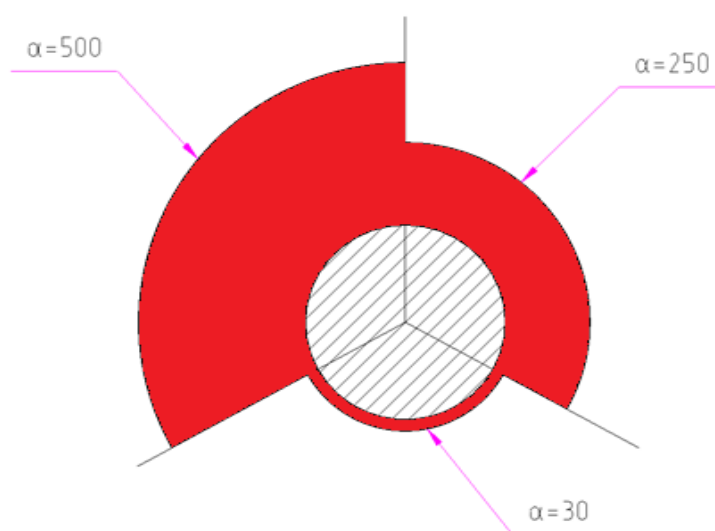


Рис. 45 – Пример распределения интенсивности охлаждения для трёх секторов по периметру заготовки

Термические напряжения, возникающие в затвердевающей цилиндрической заготовке, определялись по формуле [88]:

$$\sigma = \frac{\beta \cdot E}{1-\nu} \cdot \frac{q \cdot S}{2\lambda} \cdot \left(\frac{1}{2} - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right), \text{ МПа}, \quad (41)$$

где β – коэффициент линейного удлинения стали, $^{\circ}\text{C}^{-1}$;

E – модуль упругости, Па;

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

q – плотность теплового потока на поверхности заготовки, $\text{Вт}/\text{м}^2$;

S – характерный размер заготовки, м;

λ – коэффициент теплопроводности стали, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Компоненты термических напряжений определялись по следующим зависимостям:

$$\begin{aligned} \sigma_z &= \frac{\beta \cdot E}{1-\mu} \cdot \left(\frac{2}{R^2} \int_0^R t r dr - t \right) \\ \sigma_t &= \frac{\beta \cdot E}{1-\mu} \cdot \left(\frac{1}{R^2} \int_0^R t r dr + \frac{1}{r^2} \int_0^r t r dr - t \right) \\ \sigma_r &= \frac{\beta \cdot E}{1-\mu} \cdot \left(\frac{1}{R^2} \int_0^R t r dr - \frac{1}{r^2} \int_0^r t r dr \right) \end{aligned} \quad (42)$$

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

При исследовании влияния интенсивности теплоотвода от поверхности заготовки на температурные поля и величины термических напряжений, возникающих в заготовке при асимметричном охлаждении по ее периметру без учёта перетоков теплоты, были получены следующие результаты, представленные на рисунках 46 и 47.

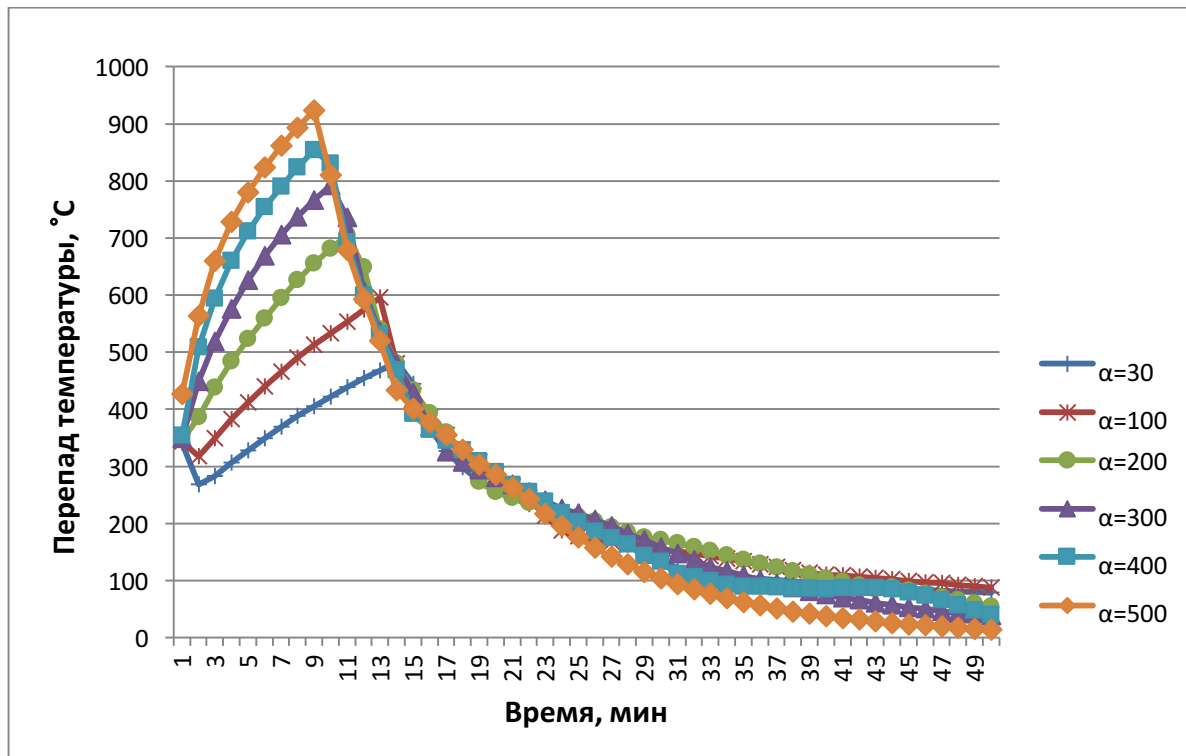


Рис 46 – Изменение перепада температур между центром и поверхностью затвердевающей заготовки во времени

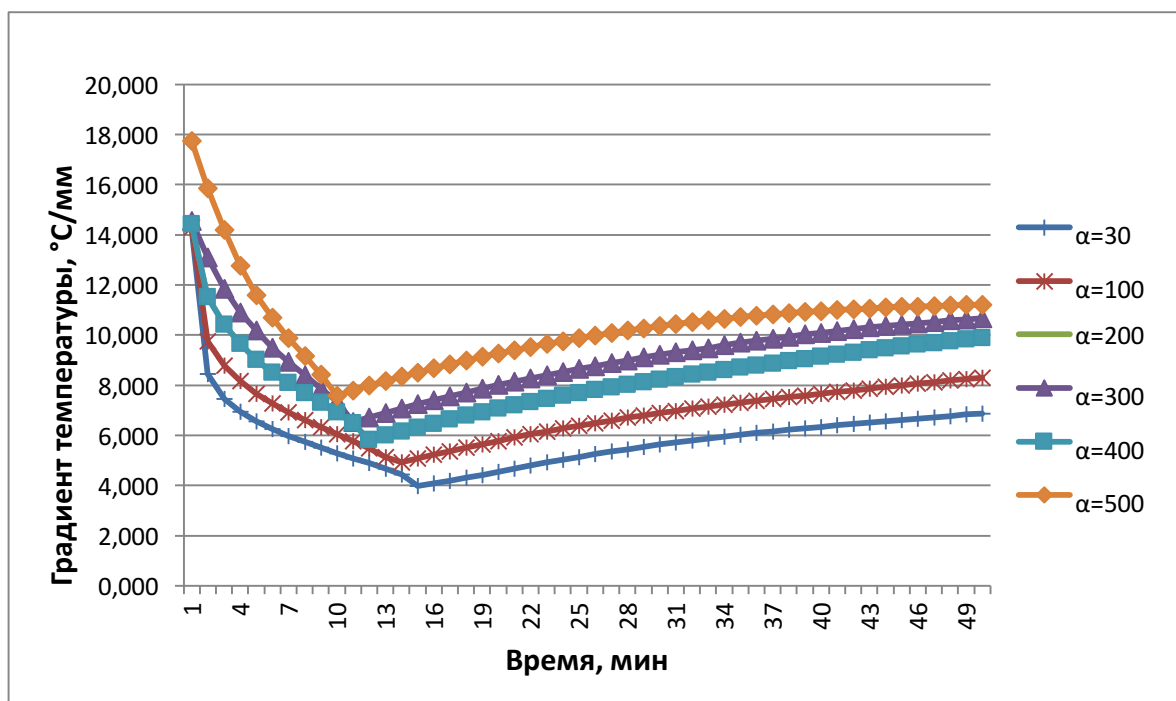


Рис. 47 – Изменение градиентов температур по длине заготовки во времени при различной интенсивности теплоотвода

На рисунке 48 приведены результаты расчётов термических напряжений между соседними секторами охлаждения заготовки в каждом сечении с шагом 0,25 м. В каждом секторе интенсивность охлаждения характеризуется различными значениями коэффициентов теплоотдачи. Прямая линия соответствует допустимым термическим напряжениям равным 909 МПа.

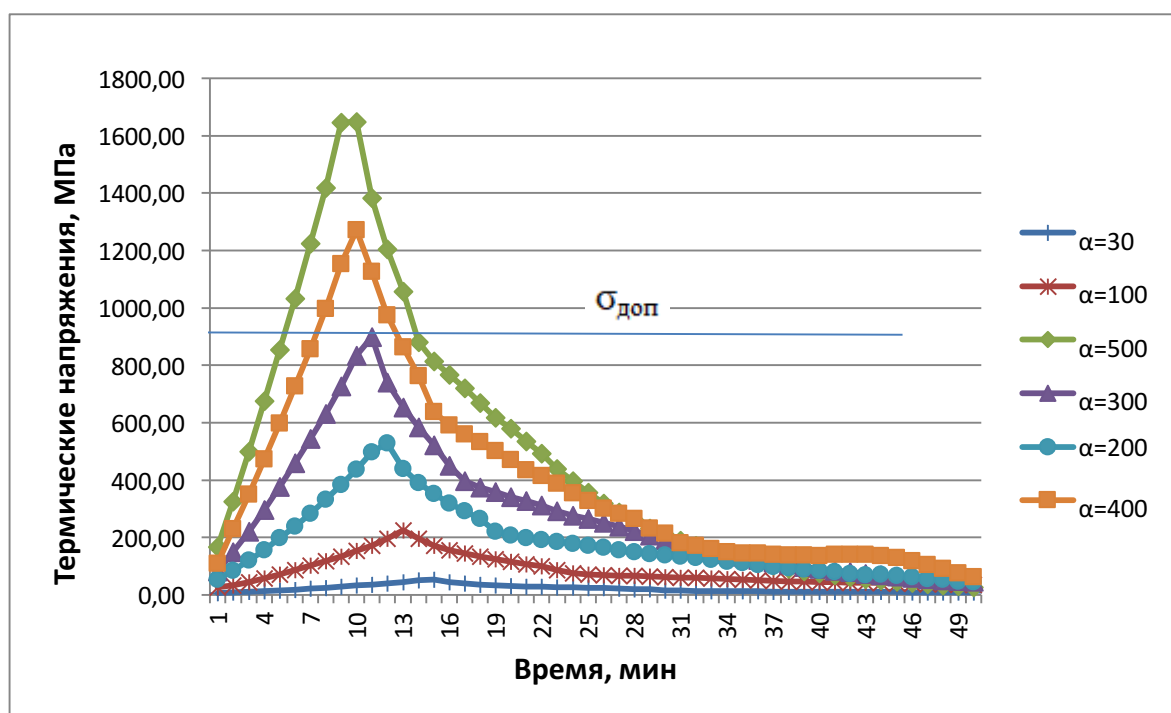


Рис. 48 – Изменение термических напряжений при различной интенсивности теплоотвода без учёта перетоков теплоты между секторами охлаждения

Анализируя рисунки 46, 47 и 48 можно сделать вывод о корреляции между величинами термических напряжений и изменением температурных полей. При увеличении разности температур между центром и поверхностью соответственно увеличиваются и значения термических напряжений, так как они прямо пропорциональны разности температур между центром и поверхностью заготовки.

Из рисунков 46 и 48 видно, что величины термических напряжений постепенно растут до определённых значений, а затем начинают уменьшаться при различных режимах охлаждения. Объясняется это тем, что с самого начала

процесса непрерывной разливки и до момента полного затвердевания заготовки разность температур между центром и поверхностью и градиент температур увеличиваются, вследствие чего растут и термические напряжения. Но с момента полного затвердевания заготовки разность температур и градиент между центром и поверхностью начинают уменьшаться, так как толщина затвердевшего металла остаётся постоянной. Благодаря этому уменьшаются и термические напряжения.

Но несмотря на это, как и в случае с несимметричностью интенсивности охлаждения по длине заготовки, при коэффициенте теплоотдачи $500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ термические напряжения существенно превышают значения допустимых. Более того, при интенсивности охлаждения, характеризуемой коэффициентом теплоотдачи $400 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, также наблюдается локальное превышение допустимых термических напряжений, что позволяет сделать вывод о необходимости дополнительных исследований влияния режимов охлаждения на величины термических напряжений, возникающих в непрерывнолитой заготовке.

4.3 Исследование влияния неоднородности граничных условий по периметру заготовки на термические напряжения с учётом перетоков теплоты

На практике при непрерывной разливке заготовок между секциями с различной интенсивностью охлаждения будут возникать перетоки теплоты, обусловленные возникновением градиентов температур. Данные перетоки будут влиять на температурные поля, выравнивая их по поверхности заготовки, и, как следствие, на возникающие термические напряжения. С практической точки зрения необходимо исследовать влияние неоднородности граничных условий охлаждения по периметру заготовки с учетом перетоков теплоты на возникающие температурные поля и термические напряжения.

Предполагается, что несимметричность охлаждения заготовки наблюдается только по её периметру. В продольном направлении интенсивность охлаждения сохраняется постоянной в рамках зон охлаждения. Присутствуют внутренние перетоки теплоты между зонами охлаждения. Длины зон охлаждения по окружности равны между собой и кратны количеству зон охлаждения. Исследуются термические напряжения, возникающие между центром заготовки и её поверхностью и между областями в соседних зонах охлаждения в каждом сечении.

Температурные поля с учетом перетоков теплоты по периметру заготовки определялись из следующей зависимости:

$$(\rho \cdot C)_j \cdot \frac{\pi \cdot \left(\left(r_j + \frac{\Delta r}{2} \right)^2 - \left(r_j - \frac{\Delta r}{2} \right)^2 \right)}{n} \cdot (T_j^k - T_j^{k-1}) = \left(\frac{\lambda^- \cdot (T_{j-1} - T_j) \Delta r}{r_j \cdot \Delta \varphi} + \frac{\lambda^+ \cdot (T_{j+1} - T_j) \Delta r}{r_j \cdot \Delta \varphi} \right) \Delta t, \quad (43)$$

где ρ - плотность затвердевшего металла, кг/м³;

C – теплоемкость затвердевшего металла, Дж/(кг·К);

r_j – радиус заготовки в расчетной точке, м;

T_j – температура затвердевшего металла в расчетной точке, К;

T_{j-1} – температура затвердевшего металла в крайней левой расчетной точке, К;

T_{j+1} – температура затвердевшего металла в крайней правой расчетной точке, К;

T_j^k и T_j^{k-1} – соответственно температура в центральной расчетной точке в k -ый и $(k-1)$ -ый моменты времени, К;

$\lambda^\pm$ - значение коэффициента теплопроводности соответственно в левой и правой крайних расчетных точках, Вт/(м·К);

$\Delta\varphi$ - угловая координата, рад;

Δt – время, с.

Проведя математические преобразования в левой части уравнения (43) и учитывая, что $\frac{2\pi}{n} = \Delta\varphi$, и обозначив сеточное Фурье f равным:

$$f^{\pm} = \frac{\lambda^{\pm}}{(\rho \cdot C)_j \cdot (r_j \cdot \Delta\varphi)^2} \cdot \Delta t. \quad (44)$$

После деления левой и правой части уравнения (43) на $(\rho \cdot C)_j \cdot r \cdot \Delta r \cdot \Delta\varphi$, получаем следующую зависимость:

$$(T_j^k - T_j^{k-1}) = (f_j^- \cdot (T_{j-1} - T_j) + f_j^+ \cdot (T_{j+1} - T_j)). \quad (45)$$

Здесь $f^{\pm}$ - значение сеточного Фурье соответственно в левом и правом углах расчетных сетки.

Для исследования градиентов температур и термических напряжений, возникающих при перетоках теплоты между секциями ЗВО использовались уравнения:

$$\text{grad}T = (T_{\text{внутр}} - T_{\text{пов}})/L, \quad (46)$$

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

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

L – толщина корочки затвердевшего металла, мм.

Термические напряжения, возникающие в затвердевающей цилиндрической заготовке, определялись по формуле [88]:

$$\sigma = \frac{\beta \cdot E}{1-\nu} \cdot \frac{q \cdot S}{2\lambda} \cdot \left(\frac{1}{2} - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right), \text{ МПа}, \quad (47)$$

где β – коэффициент линейного удлинения стали, $^{\circ}\text{C}^{-1}$;

E – модуль упругости, Па;

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

q – плотность теплового потока на поверхности заготовки, $\text{Вт}/\text{м}^2$;

S – характерный размер заготовки, м;

$\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности стали, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;

R – внешний радиус заготовки, м;

r – радиус незатвердевшей области металла, м.

При исследовании влияния интенсивности теплоотвода от поверхности заготовки на температурные поля и величины термических напряжений, возникающих в заготовке при асимметричном охлаждении по ее периметру с учётом перетоков теплоты, были получены следующие данные, проиллюстрированные рисунками 49-51.

Из рисунков 49, 50, 51 видно, что величины термических напряжений постепенно растут до определённых значений, а затем начинают уменьшаться в обоих случаях. Но термические напряжения между соседними зонами достигают существенно меньших значений, чем в рамках одной зоны охлаждения. Обусловлено это тем, что разность температур между соседними участками зон охлаждения меньше в силу возникающих перетоков теплоты, которые выравнивают температурные поля, чем между поверхностью и центром. Максимальные термические напряжения возникают между участками с наибольшим и наименьшим теплоотводом от поверхности, что объясняется наибольшей разностью температур в этих режимах.

Из данных рисунков также видно, что величины термических напряжений между секторами охлаждения будут тем меньше, чем меньше разница между интенсивностями теплоотвода в сравниваемых секторах охлаждения.

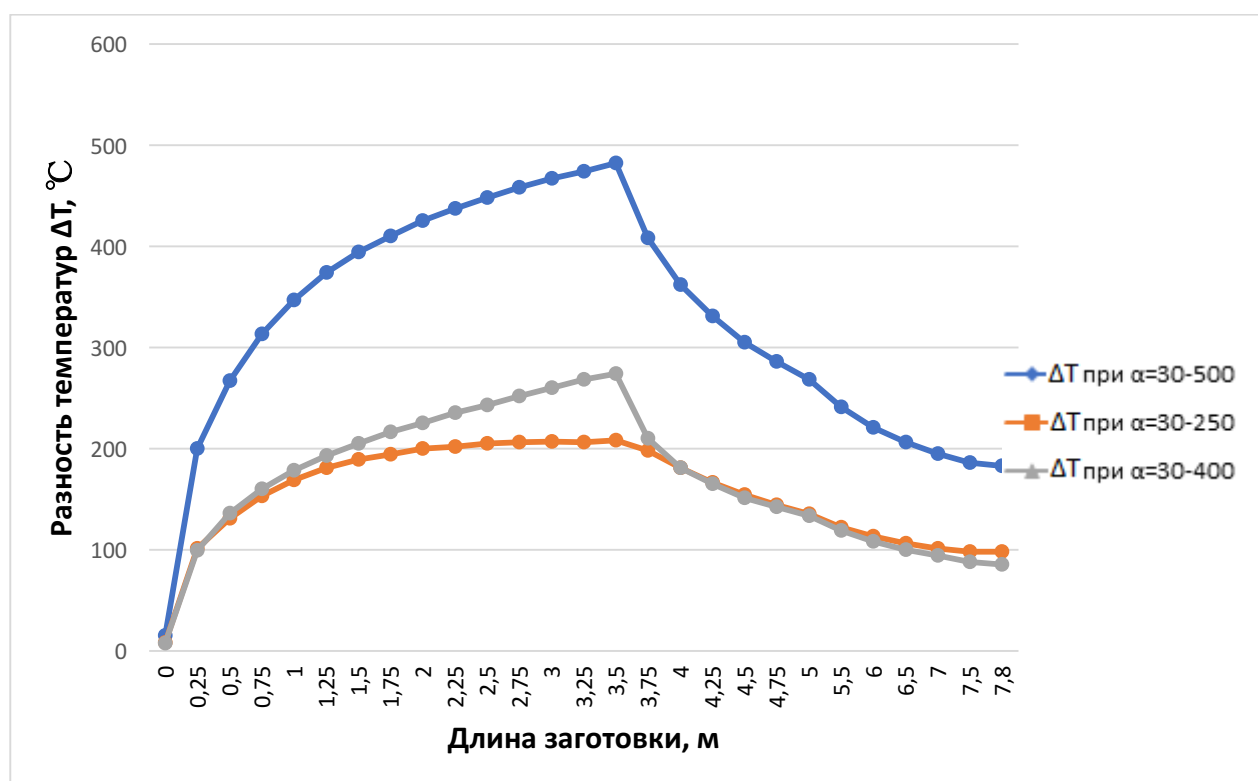


Рис. 49 – Изменение перепада температуры по поверхности заготовки при перетоках теплоты по периметру заготовки

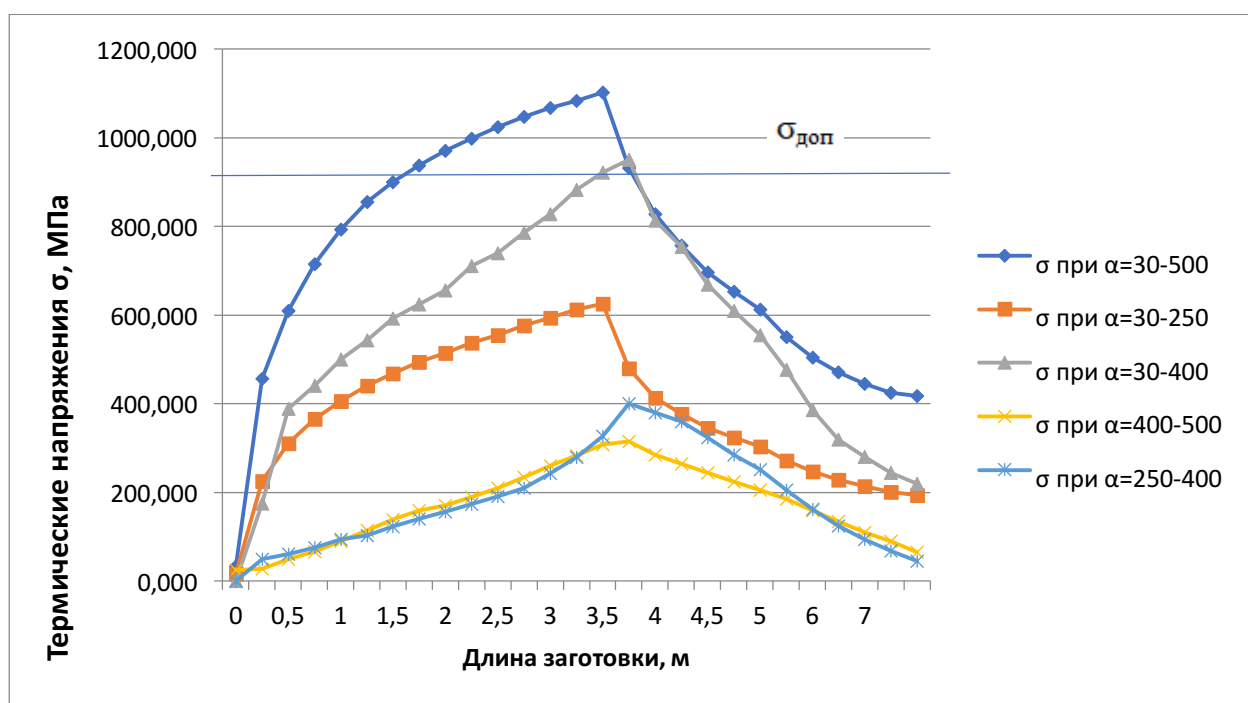


Рис. 50 – Изменение термических напряжений при различной интенсивности охлаждения заготовок с учётом перетоков теплоты по периметру заготовки

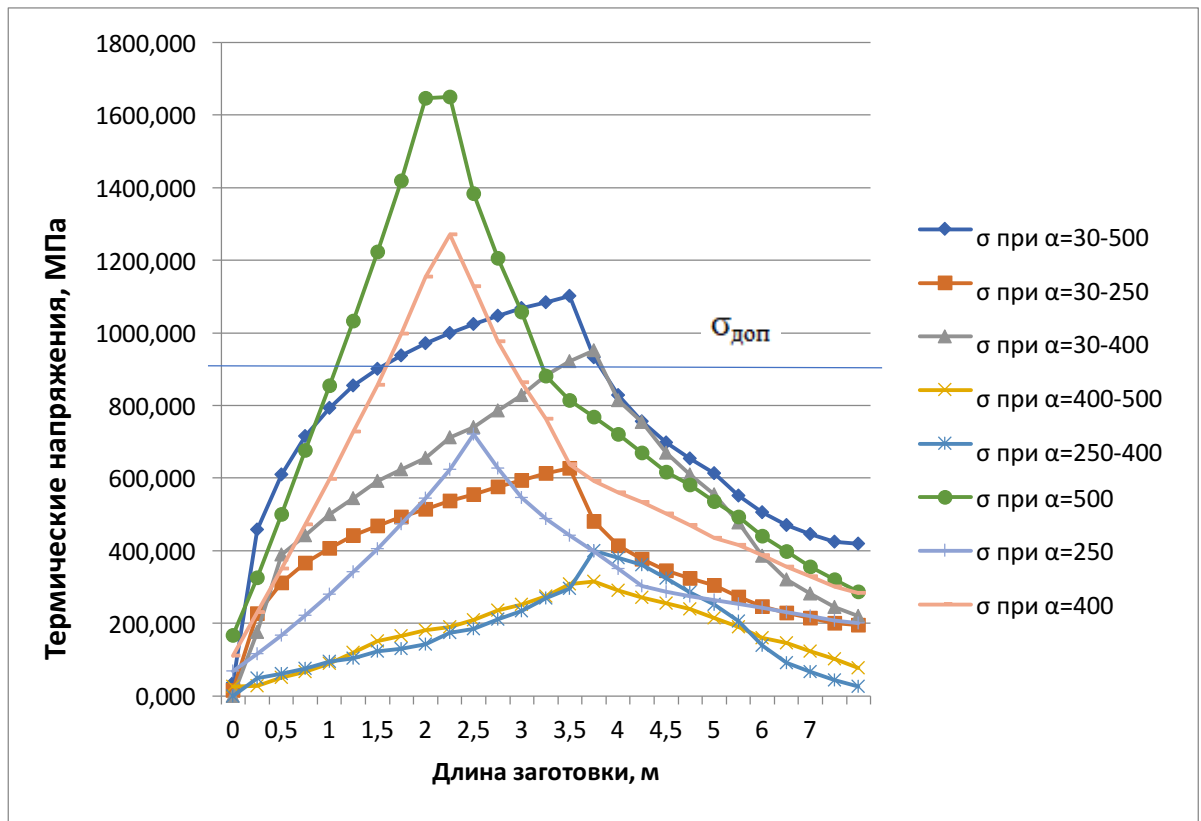


Рис. 51 – Сравнение изменения термических напряжений при различной интенсивности охлаждения заготовок без и с учётом перетоков теплоты между секциями охлаждения

Кроме того, видно, что термические напряжения между секторами с интенсивностью охлаждения, соответствующей коэффициентам теплоотдачи 30 и 400 Вт/(м²·К) меньше, чем при коэффициентах теплоотдачи 30 и 500 Вт/(м²·К). Обусловлено это меньшим значением разности интенсивностей теплоотвода в соседних секциях охлаждения, и, как следствие, меньшей разностью температур. Также важно отметить, что значения термических напряжений между зонами с интенсивностью охлаждения при коэффициентах теплоотдачи 30 и 400 Вт/(м²·К) превышают допустимые значения на небольшом участке заготовки в третьей секции зоны вторичного охлаждения, что позволяет говорить о допустимости применения режимов с данной интенсивностью охлаждения в процессе затвердевания непрерывнолитой заготовки, как предполагается в главе 3.

Проведённые исследования влияния неоднородности граничных условий на тепловое состояние заготовки показывают, что для реализации

рационального режима охлаждения целесообразно постепенно снижать интенсивность теплоотвода от поверхности затвердевающей заготовки, поддерживая при этом осесимметричный режим отвода тепла в каждом сечении согласно режиму, рекомендованному в главе 3. Это позволит обеспечить практически монотонное снижение температуры по длине заготовки без возникновения критических термических напряжений и трещин.

4.4 Выводы

1. Показано, что ведение процесса охлаждения при интенсивности теплоотвода с коэффициентами теплоотдачи $500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ и выше может привести к превышению допустимых термических напряжений и дефектам непрерывнолитой заготовки.

2. Проведены расчеты возникающих термических напряжений при различных режимах охлаждения непрерывнолитой заготовки как для случаев симметричного, так и для асимметричного распределения интенсивности теплоотвода от поверхности заготовки.

3. Показано, что исследованный режим охлаждения при коэффициентах теплоотдачи 400, 300 и $225 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ в качестве рационального соответствует предъявляемым к нему требованиям и не приводит к превышению допустимых термических напряжений.

4. Показано, что неоднородность граничных условий оказывает сильное влияние на тепловое состояние затвердевающей непрерывнолитой заготовки и может приводить к появлению различных дефектов в получаемой заготовке.

5. Вследствие перетоков теплоты между секторами периметра с разной интенсивностью охлаждения температурные поля частично выравниваются, а величины термических напряжений в сечениях становятся меньше.

ГЛАВА 5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЗВО ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ ЗАГОТОВОК

5.1 Анализ современных распыливающих устройств, применяемых в металлургии

Для охлаждения затвердевающего металла при разливке широко применяют устройства для распыления жидкостей (форсунки и распылители).

Форсунки должны удовлетворять следующим требованиям [90, 90]:

- 1) работать в диапазоне давлений 0,2–0,8 МПа,
- 2) обладать хорошей распыливающей способностью,
- 3) быть устойчивыми к засорению,
- 4) распределять воду равномерно по орошаемой поверхности,
- 5) малые затраты энергии,
- 6) простота конструкции и обслуживания.

Работу форсунки характеризуют следующие параметры:

- 1) максимальный объёмный расход жидкости,
- 2) максимальное давление жидкости на входе в форсунку,
- 3) величина коэффициента расхода,
- 4) угол факела распыленной жидкости, измеренный у среза сопла форсунки (корневой угол факела),
- 5) величина, характеризующая дисперность распыливания жидкости форсункой, заданная при определённом перепаде давления жидкости,
- 6) равномерность распределения распыленной жидкости вокруг оси и по радиусу факела.

Конструктивно разные виды форсунок могут сильно отличаться друг от друга и классифицируются по принципу действия, где в основе лежит способ подвода энергии, расходуемой непосредственно на диспергирование [91].

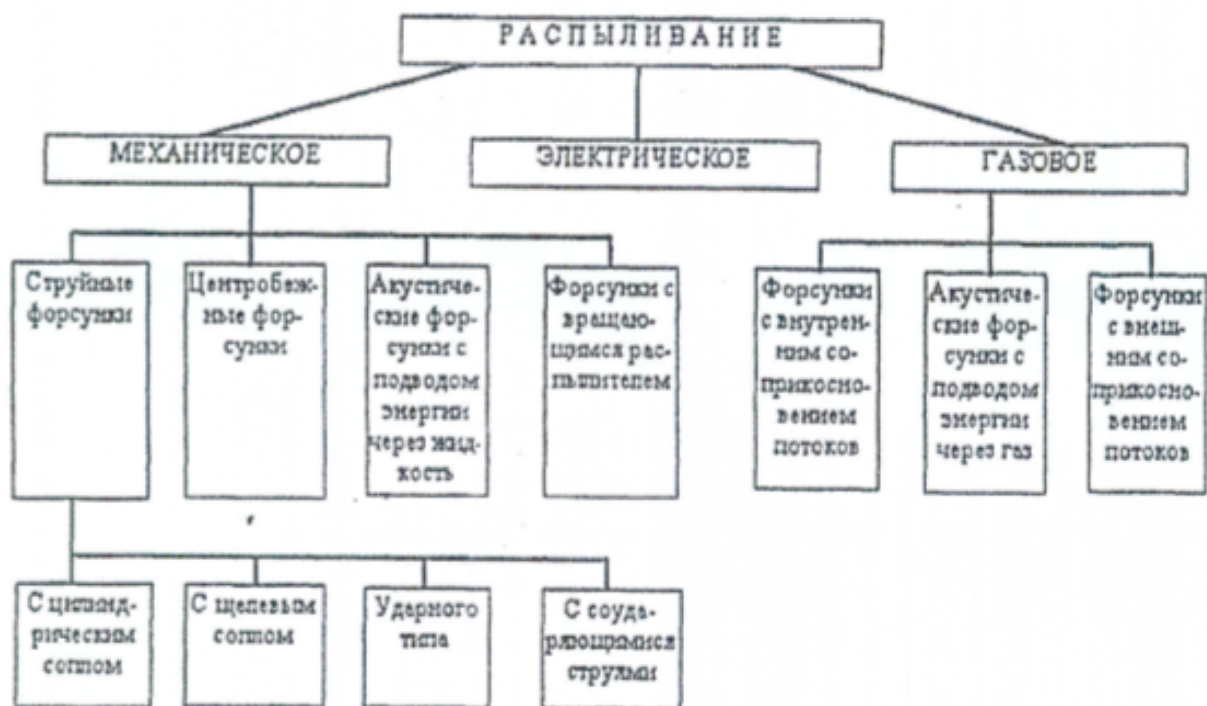


Рис. 52 – Классификация способов распыливания форсунками

Анализ классификации способов распыливания жидкостей позволяет сделать следующие выводы [93]:

1) течение жидкости перед распыливанием должно быть преобразовано в такие формы (струя, плёнка), которые обладают наибольшей поверхностной энергией и поэтому являются неустойчивым и быстро распадаются,

2) все рассмотренные способы распыливания жидкости обусловлены потерей устойчивости течения в струях или плёнках в связи с возникновением неустойчивых волн на поверхности раздела жидкости и газа.

Данные по производительности и удельной энергии для различных типов форсунок представлены в таблице 12 [94, 95].

Широкое распространение центробежных форсунок объясняется простотой их конструкции, надёжностью, достаточной эффективностью распыливания и простотой подбора формы факела. Кроме того, в них легко

изменяется коэффициент расхода, т.е. имеется большая возможность для создания регулируемых форсунок [96].

Таблица 12 – Данные по производительности и удельной энергии для различных типов форсунок

Тип форсунки	Производительность, кг/ч	Давление, кгс/см ²		Удельная энергия, при расходе жидкости 1000 кг/ч), кВт/ч
		газа	жидкости	
Центробежная	5 – 5000	-	70	2 – 3
Вращающаяся	1 – 15000	-	-	15
Ультразвуковая	500	-	-	2
Пневматическая	200	3 - 6	1	50 – 60
Пневмомеханическая	400 – 6400	1.5 - 9	35	4 - 6

5.2 Расчет требуемых расходов и плотностей орошения с целью обеспечения рационального режима ЗВО с использованием форсуночных устройств

Для определения требуемой плотности орошения и количества водовоздушной смеси, необходимых для реализации выбранного рационального режима охлаждения в ЗВО, были проведены инженерные расчеты по изучению гидравлических и теплотехнических характеристик устройств охлаждения. В результате расчётов были определены расходы водовоздушной смеси и плотности орошения для обеспечения выбранного рационального режима охлаждения, которые можно использовать на практике.

Для эффективной организации режима охлаждения заготовок определяется необходимое количество воды на каждую секцию для выбранного рационального режима охлаждения. Исходя из этого, выбираются форсунки для обеспечения рационального режима охлаждения.

Общий расход воды на секцию рассчитывается по формуле [97]:

$$V = g \cdot F / K_{\text{и}} \quad (48)$$

где g – плотность орошения на данном участке, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$;

F – площадь орошаемой поверхности, м^2 ;

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

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

Плотность орошения определяется по формуле

$$g = (\alpha - \alpha_0) / B \quad (49)$$

где α – средний коэффициент теплоотдачи по зоне вторичного охлаждения, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

α_0 – номинальный коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

B – опытный коэффициент, который для вертикальных установок

непрерывной разливки изменяется в пределах от 34 до 40 $(\text{Вт} \cdot \text{ч})/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$.

В расчетах значение коэффициента B принимали равным 37 $(\text{Вт} \cdot \text{ч})/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$.

Площадь орошаемой поверхности определяется по формуле

$$F = \pi \cdot d \cdot L, \quad (50)$$

где d – диаметр заготовки, м;

L – длина орошаемой поверхности, м.

Определяется расход воды для каждой секции вторичного охлаждения.

Таблица 13 – Данные для расчетов расхода воды для охлаждения заготовки

№ секции ЗВО	1	2	3
Длина секции ЗВО, м	0,38	1,17	2,04
Средний коэффициент теплоотдачи по секции ЗВО, Вт/(м ² ·К)	400	300	225
Диаметр заготовки, м	0,25		

I секция:

Площадь орошаемой поверхности $F=3,14 \cdot 0,25 \cdot 0,38=0,298 \text{ м}^2$.

Плотность орошения $g = (400-140)/37=7 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Общий расход воды на секцию $V=7 \cdot 0,298=2,1 \text{ м}^3/\text{ч}$.

II секция:

Площадь орошаемой поверхности $F=3,14 \cdot 0,25 \cdot 1,17=0,92 \text{ м}^2$.

Плотность орошения $g = (300-140)/37=4,3 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Общий расход воды на секцию $V=4,3 \cdot 0,92=4 \text{ м}^3/\text{ч}$.

III секция:

Площадь орошаемой поверхности $F=3,14 \cdot 0,25 \cdot 2,04=1,6 \text{ м}^2$.

Плотность орошения $g = (225-140)/37=2,3 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Общий расход воды на секцию $V=2,3 \cdot 1,6=3,7 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Суммарный расход охлаждающей воды на все секции
 $V=V_1+V_2+V_3=2,1+4+3,7=9,8 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Результаты расчётов представим в виде таблицы.

Таблица 14 – Расход воды на охлаждение заготовки по зонам вторичного охлаждения

Номер секции ЗВО	Расход воды на секцию, м ³ /ч
I	2,1
II	4
III	3,7
Суммарный расход	9,8

Как известно в системах охлаждения заготовок для обычных сталей (например, строительных) используются, как правило, однофазные форсунки преимущественно с полноконусным факелом распыла [98]. В системах охлаждения высококачественных марок сталей, к которым, в частности, относятся коррозионностойкие, необходимы широкий диапазон регулирования и часто малые расходы, что невозможно достичь с помощью однофазного распыливания. Поэтому для охлаждения заготовок из высококачественных марок сталей применяются двухфазные форсунки [99].

Рисунок 53 позволяет определить то количество воды, которое необходимо подать на поверхность заготовки высотой 1 метр для обеспечения необходимого коэффициента теплоотдачи. На практике это позволит 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.

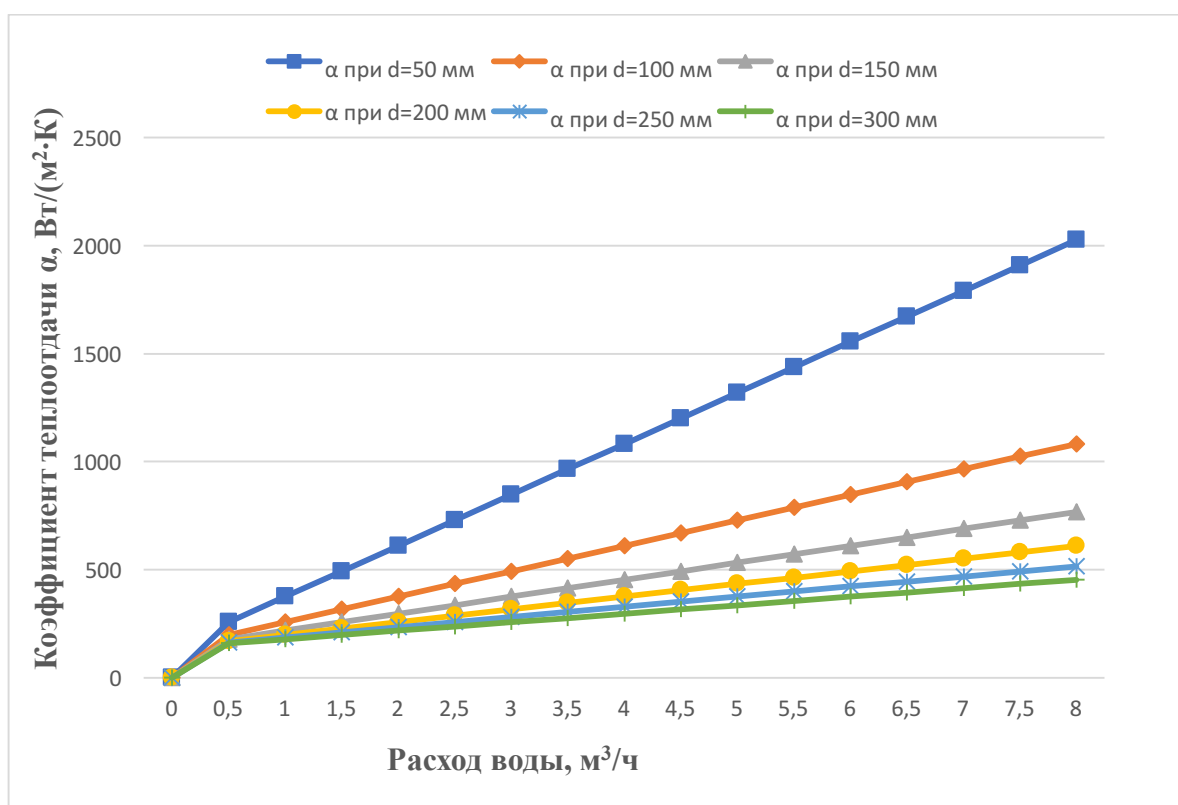


Рис. 53 – График зависимости коэффициента теплоотдачи от расхода подаваемой воды на поверхность металла при различных диаметрах заготовки

При выборе устройств охлаждения также необходимо принимать во внимание расход воздуха для распыления, стабильность водовоздушного факела и характер зависимости расхода воды от давления. Наиболее полно предъявляемым требованиям отвечают двухфазные круглофакельные водовоздушные форсунки с номинальным расходом по воде 0,42 и 0,9 м³/ч, например, фирмы Lechler [100].

Стоит также отметить, что при температурах поверхности заготовки от 300 до 700 °С при распыливании жидкости наблюдается пузырьковый режим кипения, коэффициент теплоотдачи при котором изменяется в интервале 2000–11000 Вт/(м²·К), а при температурах выше 700 °С наблюдается плёночное кипение жидкости, при котором на поверхности затвердевающей заготовки образуется паро-воздушная плёнка, из-за чего коэффициент теплоотдачи

значительно снижается [101], изменяясь в диапазоне 150-500 Вт/(м²·К). В отдельных случаях это может привести к перегреву поверхности заготовки.

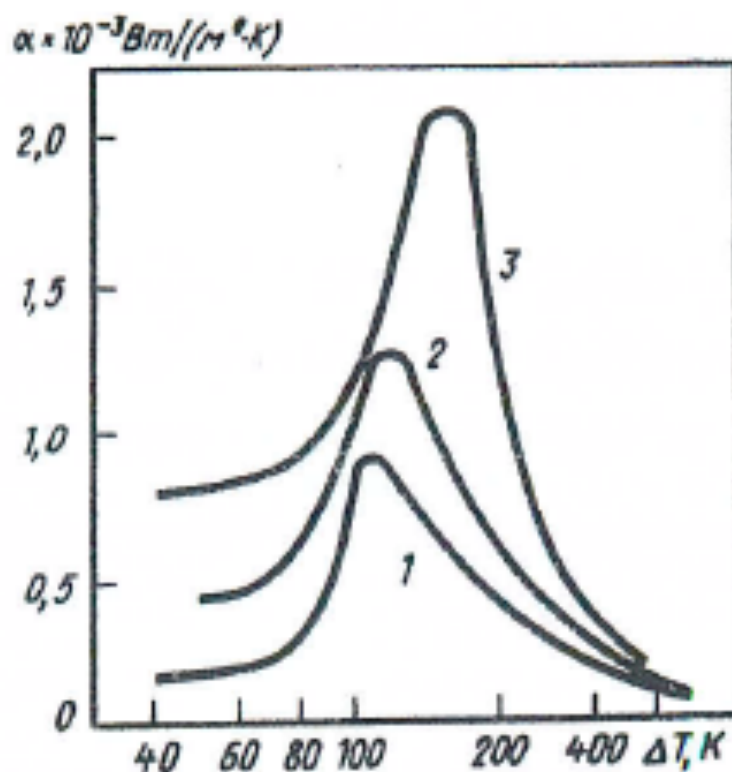


Рис. 54 – Зависимость коэффициента теплоотдачи α от температурного напора ΔT при плотности потока жидкости m , кг/(м²·с): 1- 0,06; 2 – 0,14, 3 – 0,25

Но несмотря на то, что процесс непрерывной разливки стали происходит при температурах, превышающих 700 °С, и на поверхности заготовки будет образовываться пароводяная плёнка, это не будет отрицательно сказываться на процессе затвердевания заготовки. Обусловлено это тем, что даже при плёночном режиме охлаждения будет обеспечиваться достаточный для реализации рационального режима теплоотвод от поверхности заготовки, характеризуемый коэффициентами теплоотдачи до 400 Вт/(м²·К), что хорошо согласуется с исследованиями, описанными в работе [74, 102]. В свою очередь пузырьковый режим будет способствовать слишком интенсивному охлаждению

заготовки, что приведёт к значительным перепадам температур на поверхности затвердевшего металла и превышению допустимых термических напряжений.

Установлено также, что при прочих равных условиях рассредоточенный подвод воздуха к соплу форсунки обеспечивает более мелкое распыление воды по сравнению с соосным подводом воздуха через одно сопло [103]. Распределение капель воды по размерам по полю орошения качественно соответствует параболической зависимости распределения плотности орошения. Наиболее крупные капли (100 мкм и более) сосредоточены в центре поля орошения, а более мелкие (70 мкм и менее) характерны для краевых областей водовоздушного факела [104].

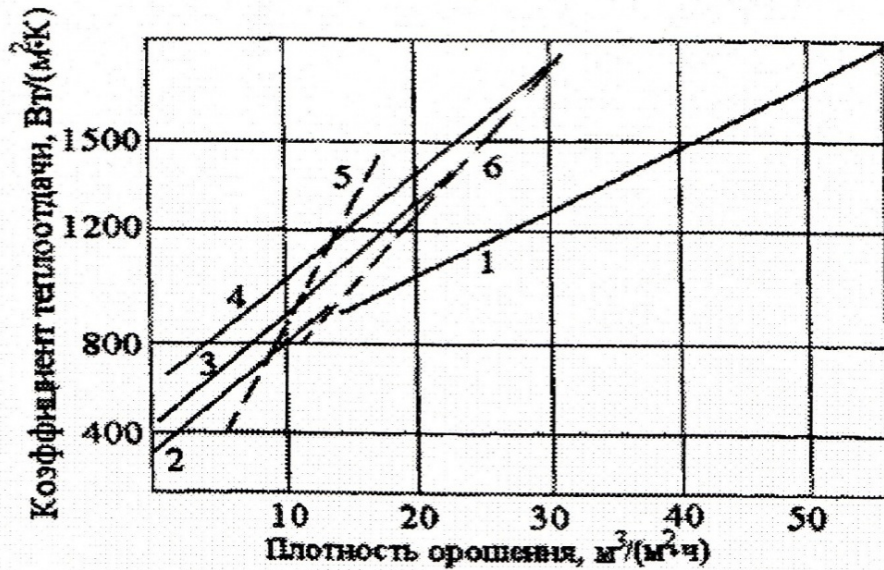
Сопоставительный анализ изменения значений коэффициентов теплоотдачи в зависимости от плотности орошения (рисунок 55) позволяет сформулировать ряд выводов, характерных для применяемого процесса водовоздушного охлаждения:

1) при одинаковых значениях плотности орошения водовоздушное сравнении с водяным обеспечивает более интенсивное охлаждение, что дает возможность уменьшить расходы воды на охлаждение непрерывнолитых заготовок в 1,5-2 раза;

2) обладает более широким диапазоном регулирования интенсивности охлаждения по сравнению с водяным;

3) обеспечивает более устойчивую работу форсунок при малых локальных плотностях орошения $0,5-15 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, при которых аналогичные форсунки при распылении одной воды работать не могут;

4) способствует более равномерному охлаждению поверхностей при прочих равных условиях по сравнению с водяным охлаждением.



1 – водяное охлаждение; 2, 3, 4 – водовоздушное охлаждение; 5 – граница дисперсности капель размером 100 мкм; 6 – граница дисперсности капель размером 1000 мкм

Рис. 55 – Зависимость изменения коэффициента теплоотдачи от плотности орошения

Таким образом выбранная система водовоздушного вторичного охлаждения:

- позволяет реализовать рациональный (для коррозионностойких марок сталей) режим охлаждения заготовки в зоне вторичного охлаждения,
- обеспечивает возможность гибкого изменения теплоотода с поверхности заготовки,
- обеспечивает широкий диапазон пределов регулирования интенсивности охлаждения заготовки,
- обеспечивает равномерное охлаждение по периметру и длине заготовки, что способствует уменьшению количества дефектов, снижению пораженности поверхностными и внутренними трещинами.

5.3 Выводы

1. Описаны основные виды распыливающих устройств, применяемых в металлургии с целью охлаждения затвердевающего металла.
2. Описаны особенности применения водовоздушных форсунок, применяемых для охлаждения заготовок из различных марок сталей в процессе непрерывной разливки.
3. Определены плотность орошения и требуемый расход водовоздушной смеси для обеспечения рационального режима охлаждения заготовок из коррозионностойких марок сталей на практике.
4. Выбран тип форсунок для охлаждения непрерывнолитых заготовок из коррозионностойких марок сталей для реализации рационального режима охлаждения.
5. Приводятся данные, иллюстрирующие зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности орошения на поверхности заготовки и расходные характеристики форсунок, которые обеспечат соблюдение рационального режима охлаждения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проанализированы современные тенденции и теплофизические проблемы в развитии технологии непрерывной разливки заготовок круглого сечения из различных специальных (жаропрочных, инструментальных, конструкционных, коррозионностойких) марок сталей.

2. Разработана математическая модель процесса охлаждения при непрерывной разливке заготовок круглого сечения, учитывающая выделение теплоты кристаллизации в двухфазной области путём присвоения численных значений теплофизическим параметрам с учётом зависимости относительной объёмной доли жидкой и твёрдой фазы от температуры и позволяющая минимизировать дефекты в непрерывнолитой заготовке.

3. Разработан рациональный режим охлаждения заготовок из коррозионностойких марок сталей в зоне вторичного охлаждения, который обеспечит их затвердевание без превышения допустимых термических напряжений.

4. Выбрана рациональная скорость разливки заготовок из коррозионностойких марок сталей в кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения, которая составляет 0,65 м/мин.

5. Рациональный режим охлаждения характеризуется коэффициентами теплоотдачи, равными 400, 300 и 225 Вт/(м²·К) в первой, второй и третьей секциях зоны вторичного охлаждения соответственно.

6. 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, что осевые и радиальные перетоки теплоты деформируют температурные поля в заготовке и, как следствие, влияют на возникающие в процессе охлаждения термические напряжения.

7. Проведены расчеты 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 рациональные режимы охлаждения, при которых возникающие термические напряжения не превышают допустимых значений.

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

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Емельянов В.А. Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок: Учебное пособие. – М.: Металлургия. - 1988. – 142 с.
- 2 Евтеев Д.П., Колыбалов И.Н. Непрерывное литьё стали. – М.: Металлургия. - 1984. – С.131-135.
- 3 Кан Ю.Е. Управление технологическим процессом производства непрерывнолитых заготовок // Непрерывная разливка стали. – М.: Металлургия, 1989. - С. 9-16.
- 4 Лин Дж. Б. Исследование непрерывной разливки стали. – М.: Металлургия, 1982. - С.159-168.
- 5 Сладкошteeв В.Т., Потанин Р.В., Суладзе О.Н. Непрерывная разливка стали на радиальных установках. – М.: Металлургия, 1974. - 288 с.
- 6 Рудой Л.С. К вопросу о формировании и поведении непрерывного стального слитка в кристаллизаторе // Изв. ВУЗов, Черная металлургия. - 1962. - № 2. - С. 51-55.
- 7 Генкин В.Я., Есаулов А.Т., Староселецкий М.И. Непрерывнолитые круглые заготовки // М. : Металлургия, 1984. – 142 с.
- 8 Основные дефекты непрерывнолитых заготовок. // Студопедия: официальный сайт. – URL: http://studopedia.net/5_13981_osnovnie-defekti-neprerivnolitih-zagotovok.html (дата публикации: 01.04.2014)
- 9 Хофман Р. Строение твердых тел и поверхностей. – М.: Мир, 1990. – 216 с.
- 10 Флендер Р., Вюнненберг К. Образование внутренних трещин в непрерывных заготовках // Черные металлы. - 1982. - № 23. – С.24-32.
- 11 Малиночка Я.Н., Моисеева Л.А., Есаулова Т.В. Некоторые дефекты непрерывнолитых слитков и улучшение качества металла // Сталь. – 1987. - № 10. С. 27-30.

- 12 Мищенко И.О. Управление уровнем дефектов поверхности и макроструктуры непрерывно-литых слэбов МНЛЗ. // Дисс. на соискание ученой степени канд.техн.наук. - Москва, 2006.
- 13 Мираслимов В.М., Емельянов В.А. Напряженное состояние и качество непрерывного слитка. –М.: Металлургия, 1990. – 151 с.
- 14 Полушкин Н.А., Астров Е.И., Скворцов А.А., Клипов А.Д. Некоторые вопросы затвердевания непрерывного стального слитка / Непрерывная разливка стали. Под ред. О.В. Мартынова. - М.: Металлургия, 1970. – С. 263-267.
- 15 Скворцов А.А., Акименко А.Д., Ульянов В.А. Влияние внешних воздействий на процесс формирования слитков. – М.:Металлургия, 1991. – 216 с.
- 16 Евтеев Д.П. Основные закономерности теплообмена между кристаллизатором и плоским слитком // Сталь. - 1969. - № 8. – С. 696-700.
- 17 Лейтес А.В. Защита стали в процессе непрерывной разливки – М.: Металлургия, 1984. – 180 с.
- 18 Казачков Е.А., Остроушко А.В., Живило С.В. Экспериментальное определение и прогнозирование свойств шлакообразующих смесей для непрерывной разливки стали // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту: Зб. наук. пр. – Мариуполь, 2003. – Вип. 13. – С. 37-41.
- 19 Свойства шлакообразующих смесей для непрерывной разливки стали с повышенной скоростью / А.Н. Смирнов, С.Л. Макуров, М.В. Епишев, А.Ю. Цупрун // Металл и литье Украины. – 2006. – № 1. – С. 55-58.
- 20 Исаченко В.П., Кушнырев В.И. Струйное охлаждение. –М.: Энергаториздат. 1984. – 216 с.
- 21 Винцек М., Бердичевский Ю.Е. Серия исследований процесса теплоотвода в зонах вторичного охлаждения при применении форсунок высокой производительности // Сталь. - 2004. - № 8. - С.28-32.
- 22 Никитенко Н.И., Евтеев Д.П., Соколов Л.А., Сновида Н.Р. Об оптимальных условиях охлаждения слитка при динамическом режиме

- работы установок непрерывной разливки стали // Металлы. – 1978. - № 1. – С.106-113.
- 23 Лапотышкин Н.М., Лейтес А.В. Трещины в стальных слитках. - М.: Металлургия, 1969. С. 112.
- 24 Дождиков В.И. Теплофизические закономерности формирования непрерывного слитка и совершенствование систем его охлаждения. // Дис. на соискание ученой степени док.техн.наук. – М.,1995. - 46 с.
- 25 Гиря А.П. Исследование и разработка режимов охлаждения непрерывных слитков // Дисс. на соискание ученой степени канд.техн.наук. - М., 1982.
- 26 Самойлович Ю.А. О выборе критериев оптимального затвердевания слитка // Оптимизация теплофизических процессов литья. – Киев: ИПЛ АН УССР, 1977.- С.59.-65.
- 27 Евтеев Д.П. Основные закономерности теплообмена между кристаллизатором и плоским слитком // Сталь.- 1969. - № 8. – С. 696-700.
- 28 Стальной слиток. В 3 т. Том 2. Затвердевание и охлаждение / Самойлович Ю.А., Тимошпольский В.И., Трусова И.А., Филиппов В.В. – Мн.: Белорусская наука, 2000. – 637 с.
- 29 Рутес В.С., Аскольдов В.И., Евтеев Д.П. Теория непрерывной разливки. - М.: Металлургия, 1971. – 296 с.
- 30 Рудой Л.С., Майоров Н.П., Кушнырев Н.Г. Исследование характера контакта слитка со стенками кристаллизатора // – Сталь. – 1966. - № 12. – С. 1093-1094.
- 31 Якоби Х., Комма Г., Вюнненберг К. Технология непрерывного литья заготовок малого сечения // Черные металлы. – 1982. - № 9. – С. 3-11.
- 32 Максудов Ф.Г., Мирсалимов В.М., Емельянов В.А. К математическому моделированию оптимизации формирования качественных непрерывных слитков // Известия АН АзССР. Сер.физ.-техн. и матем.наук. – 1977. - № 3. - С.3-9.
- 33 Полушкин Н.А., Астров Е.И., Скворцов А.А., Клипов А.Д. Некоторые вопросы затвердевания непрерывного стального слитка / Непрерывная

- разливка стали. Под ред. О.В. Мартынова, -М.: Металлургия, 1970. – С.263-267.
- 34 Экспериментальное исследование гидродинамики и теплообмена при форсуночном охлаждении непрерывного стального слитка / Л.И. Урбанович, В.А. Горяинов, В.В. Севостьянов и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. - 1980. - №9. - С. 145-149.
- 35 Евтеев Д.П., Соколов Л.А., Лебедев В.И. О выборе граничных условий при расчетах затвердевания слитка // Сталь. – 1975. - № 1. – С.23-32.
- 36 Скворцов А.А., Акименко А.Д. Теплопередача и затвердевание стали в установках непрерывной разливки. - М.: Металлургия, 1966. – 190 с.
- 37 Акименко А.Д., Китаев Е.М., Скворцов А.А. Тепловой расчет машин непрерывного литья стальных заготовок. – Горький: ГПИ, 1979. – 86 с.
- 38 Дождиков В.И. Теплофизические закономерности формирования непрерывного слитка и совершенствование систем его охлаждения. –Дис. Док.техн.наук. – М.,1995.
- 39 Боришанский В. М., Кутателадзе С.С., Новиков Н.И. и др. Жидкометаллические теплоносители. – М.: Атомиздат, 1976. – 328 с.
- 40 Тымчак В.М., Гусовский В.Л. Расчет нагревательных и термических печей. Справочное издание. – М.: Металлургия, 1983. – 480 с.
- 41 Журавлев В.А., Китаев Е.М. Теплофизика формирования непрерывного слитка. – М.: Металлургия, 1974. – 215 с.
- 42 Чижигов А.И., Перминов В.П. Тепловые условия формирования сортовых заготовок сечением 280·280 мм² // Физико-химические и теплофизические процессы кристаллизации стальных слитков: Труды 11 конференции по слитку. – М.: Металлургия, 1967. – С. 469-474.
- 43 Исследование теплофизических особенностей формирования слитка в кристаллизаторах с бронзовыми рабочими стенками и в зоне вторичного охлаждения с новыми хладогентами. – Отчет о НИР (заключит.) / Липецкий политехнический институт (ЛипПИ). №ГР 830021970. – Липецк, 1983.

- 44 Соболев В.В., Трефилов П.М. Оптимизация тепловых режимов затвердевания расплавов. - Красноярск: Изд-во КГУ, 1986. – 152 с.
- 45 Рутес В.С., Евтеев Д.П. Непрерывная разливка стали. - М.: Знание, 1956. – 31 с.
- 46 Будрин Д.В., Кондратов В.М. Особенности спрейерного метода охлаждения при термообработке // Известия ВУЗов. Черная металлургия.- 1964 - № 11. – С.168-173.
- 47 Охотский В.Б. Закономерности выбора скорости разливки стали // Известия ВУЗов. Черная металлургия. - 1999. - № 6. – С.10-15.
- 48 Парфенов Е.П., Смирнов А.А. Об управлении вторичным охлаждением слитка при работе МНЛЗ по динамическому режиму // Сталь. - 2001. - № 10. – С.22-26.
- 49 Иерусалимов И.П., Суковатин И.В. Исследование динамики продвижения слитка в МНЛЗ // Сталь. – 2003. - № 4. – С.26-29.
- 50 Лукин С.В., Калягин Ю.А., Шестаков Н.И., Габелая Д.И. Охлаждение и затвердевание сляба в МНЛЗ при переходных режимах разливки // Известия ВУЗов. Черная металлургия. - 2004 - № 1. – С.59-61.
- 51 Столяров А.М., Селиванов В.Н., Буданов Б.А. Разработка рационального режима вторичного охлаждения непрерывнолитых слябов // Известия ВУЗов. Черная металлургия. - 2004. - № 2. – С.55-57.
- 52 ЦНИИчермет - основоположник непрерывной разливки стали в Советском Союзе. - URL: <http://uas.su/conferences/2010/50let/06/00006.php>
- 53 Жидкометаллические теплоносители / В.М. Боришанский, С.С. Кутателадзе, Н.И. Новиков и др. – М.: Металлургия, 1983. – 328 с.
- 54 Херинг Л., Фенцке Г.В. Текущий контроль теплового потока при литье слябов на МНЛЗ // Чёрные металлы. – 1992. - № 7. – С.43 – 48.
- 55 Шарапов А. И. Исследование и разработка разбрызгивающих устройств и систем охлаждения для МНЛЗ. Дисс. на соискание ученой степени канд.техн.наук. - Липецк, 2005.

- 56 Освоение непрерывной разливки стали /Акименко А.Д. и др. - Л.: Судпромгиз, 1960. - 228 с.
- 57 Труды VI конференции по слитку. Т.6. Проблемы стального слитка: - М.: Metallurgia, 1976.
- 58 Metallургическая теплотехника. В 2-х томах. Т. 1. Теоретические основы: Учебник для вузов/ Кривандин В.А., Арутюнов В.А., Мaстриюков Б.С. и др. – М.: Metallurgia, 1986. - 424 с.
- 59 Теория квазиравновесной кристаллизации металлических сплавов / В. Т. Борисов, В. В. Виноградов, В. А. Ефимов, В. А. Журавлев [и др.] // Кристаллизация и компьютерные модели: (тр. IV Всесоюз. конф. по проблемам кристаллизации сплавов и компьютерного моделирования, Ижевск, окт. 1990 г.). – Ижевск, 1991 – С. 5-10.
- 60 Перемитько В.В., Окунь А.Г., Ключко Р.И., Чередник Е.А., Рейдерман Ю.И. Исследование работы форсунок аппаратов воздушного охлаждения // ВІСНИК Донбаської державної машинобудівної академії. - 2010. № 2(19). - С. 36-38.
- 61 Способ определения зависимости коэффициента теплоотдачи от расхода воды в секциях ЗВО МНЛЗ / С.В. Лукин, Н.Г. Баширов // Прогрессивные процессы и оборудование metallургического производства: Тезисы первой межд. науч.-техн. конф. – Череповец: ЧГУ, 1998. - С.38-39.
- 62 Распыливание жидкостей / Ю.Ф. Дитякин, Л.А. Клячко, Б.В. Новиков, В.И. Ягодкин. - М.: Машиностроение, 1977. С. 208.
- 63 Шалимов А.Г., Готин В.Н., Тупин Н.А. Интенсификация процессов специальной электроmetallургии. - М.: Metallurgia, 1988. - С. 334.
- 64 Лукин С. В. Методические основы охлаждения металла в машинах непрерывного литья заготовок // Дисс. на соискание ученой степени докт.техн.наук. – Череповец, 2009.
- 65 Мизикар Е.А // Iron Steel Ing. - 1970. - Vol.47. - P. 53.

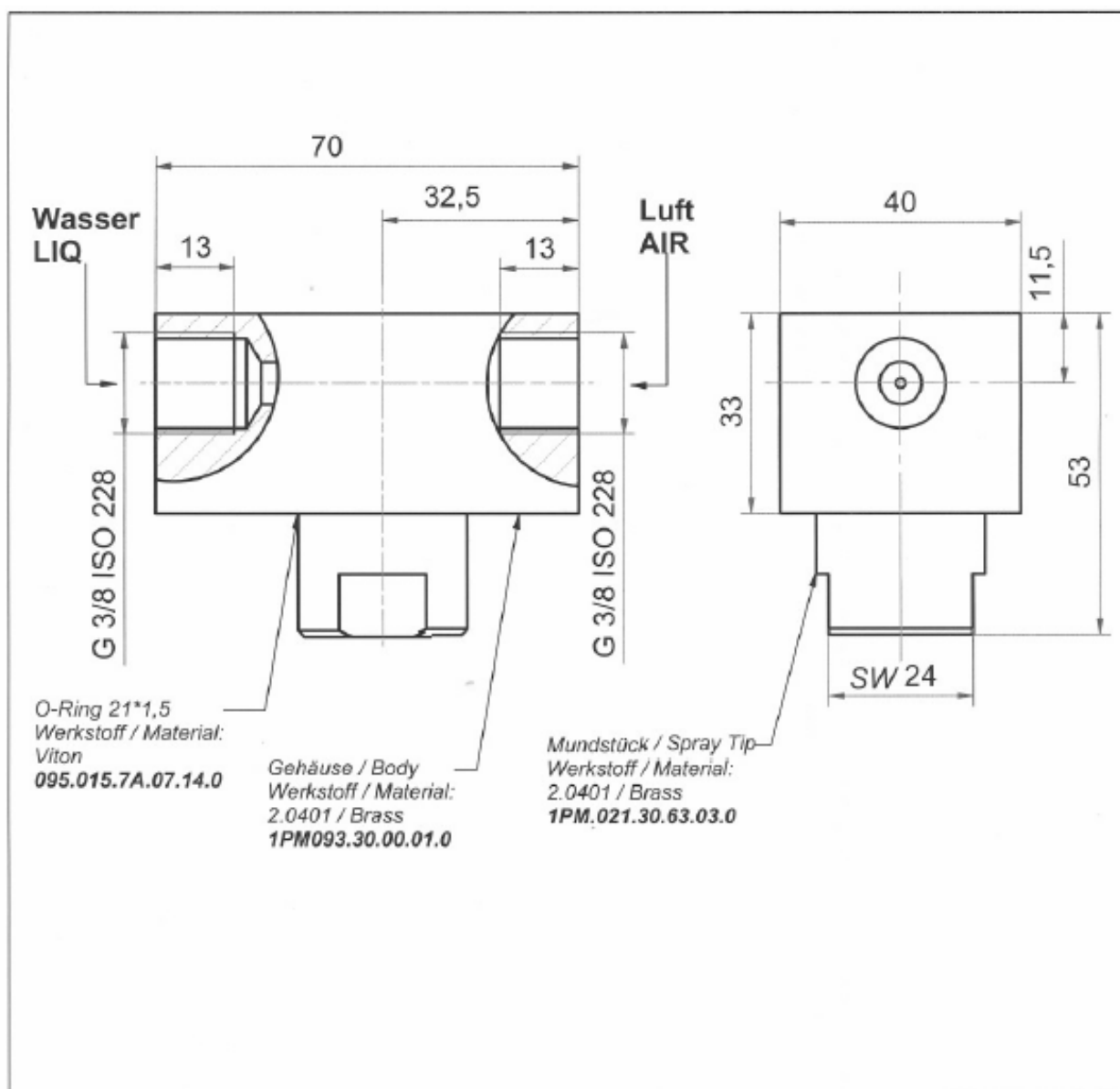
- 66 Влияние плотности орошения форсунками различной конфигурации на качество слябовой заготовки. – URL:<http://prod.bobrodobro.ru/6691>
- 67 Борисов В.Т. Теория двухфазной зоны металлического слитка. - М.: Metallurgia, 1987. - С. 56-65.
- 68 Ватолин Н. А., Пастухов Э. А. Дифракционные исследования строения высокотемпературных расплавов. - М.: Наука, 1980. - С. 82-84.
- 69 Журавлёв В.А., Колодкин В.М., Ильин Г.А. САПР технологии металлургических процессов кристаллизации // Литейное производство. - 1986. - № 4. - С.27-28
- 70 Островский О.И., Григорян В.А., Вишкарёв А.Ф. Свойства металлургических расплавов. - М.: Metallurgia, 1988. С. 304.
- 71 Есин В.О. Кристаллизация и фазовые переходы. - Мн.: Изд-во АН СССР, 1962. С. 187-193.
- 72 Соловьёв В.А., Бочаров Н.Е. Физико-химические основы производства стали. - М.: Наука, 1971. - С. 65-69.
- 73 Чижигов Ю. М. Прокатываемость стали и сплавов. - М.: Metallurgizdat, 1961. – 453 с.
- 74 Гущина М. С. Исследование влияния химического состава на механические свойства холоднокатанных полос из стали марки 08Ю // Технические науки – от теории к практике: сб. ст. по матер. XXIII междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск: СибАК, 2013. - № 23. - С. 59-68.
- 75 Непрерывная разливка стали / В.Я. Генкин, Д.П. Евтеев, М.А. Криштал, О.В. Мартынов, В.С. Рутес; Под ред. Мартынова О.В. - М.: Metallurgia, 1970. - 334 с.
- 76 Технологическая инструкция по разливке на «МЗ«Электросталь»».
- 77 Самойлович Ю.А., Тимошпольский В.И., Трусова И.А. Стальной слиток. В 3 т. Том 1. Затвердевание и охлаждение – Мн.: Белорусская наука, 2000. - 583 с.

- 78 Юречко Д.М. Увеличение производительности машин непрерывного литья заготовок при разливке стали методом "плавка на плавку" // Дисс. на соискание ученой степени канд.техн.наук. - Магнитогорск, 2002.
- 79 Арутюнов В.А., Крупенников С.А., Левицкий И.А. Численные методы решения задач теплообмена: Методическое пособие для студентов вузов. - М.: МИСиС, 2016. – С. 62.
- 80 Краюшкин Н.А., Кузнецова Н.П. Исследование тепловых режимов затвердевания круглых сортовых заготовок из высококачественных марок сталей при полунепрерывной разливке стали // Изв. Вузов. Чёрная металлургия. - 2012. - № 7. - С. 45-48.
- 81 Овдей В.Н. Термические напряжения и некоторые их проявления в металлических телах при температурных воздействиях на их поверхность // Дисс. на соискание ученой степени канд.техн.наук. - Киев, 1984.
- 82 Ларина Т.П., Ячиков И.М., Вдовин К.Н., Позин А.Е. Математическое моделирование затвердевания сляба в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок // Изв. Вузов. Чёрная металлургия. – 2011. - №2. – С. 38-31.
- 83 Кузнецова Н.П., Краюшкин Н.А. Исследование тепловых режимов затвердевания при полунепрерывной разливке круглых стальных слитков для производства бесшовных труб // Изв. Вузов. Чёрная металлургия. - 2014. - № 3. - С. 34-38.
- 84 Ноздрин А.Н. Оптимизация процесса непрерывной разливки стали на основе изучения физических свойств шлакообразующих смесей и математического моделирования тепловой работы системы кристаллизатор-шлак-металл. // Дисс. на соискание ученой степени докт.техн.наук. – Москва, 1997.
- 85 Пронина М.В. Особенности окалинообразования и усовершенствование процесса нагрева колесных заготовок в кольцевых вращающихся печах // Дисс. на соискание ученой степени канд.техн.наук. – Екатеринбург, 2003.

- 86 Исследование затвердевания непрерывного слитка при повышенных скоростях разливки / Л.И. Урбанович, В.А. Емельянов, А.П. Гиря, Е.П. Карамышева // Известия вузов. Черная металлургия. 1976. - №9. - С. 54- 56.
- 87 Краюшкин Н.А., Прибытков И.А., Шатохин К.С. Исследование влияния неоднородности граничных условий на интенсивность охлаждения цилиндрических заготовок в МНЛЗ // Изв. Вузов. Чёрная металлургия. - 2016. - № 9. - С. 650-655.
- 88 Темлянцев М.В., Осколкова Т.Н. Трещинообразование в процессах нагрева и охлаждения сталей и сплавов. – М.: Флинта; Наука, 2005. – 195 с.
- 89 Гусовский В.Л., Лифшиц А.Е.. Методики расчёта нагревательных и термических печей. – М.: Теплотехник, 2004 – 400 с.
- 90 Выборнов М.И., Андросов А.И., Шамшин Л.В. Форсуночные устройства: тематический обзор. - М., 1984. – 268 с.
- 91 Методика теплового расчёта ЗВО. // SteelLab Металлургическая лаборатория: официальный сайт. – URL: <http://steellab.com.ua/books/teplorabotaMNLZ/4.4/4.4.php> (2013-2015 г.г.)
- 92 Шатохин С.Е., Хаап Р. Современные водовоздушные форсунки для вторичного охлаждения непрерывнолитых заготовок / Труды седьмого конгресса сталеплавильщиков. - М., Черметинформация, 2003. - С. 611-613.
- 93 Справочник “Форсуночная техника”. - URL: <http://www.technospray.ru/downloads/dop/nozzles-tech.pdf>, 2012.
- 94 Майсурадзе М.В., Юдин Ю.В. Исследование закалочного охлаждения металлов и сплавов. Уральский федеральный университет. Электронное текстовое издание - Екатеринбург, 2012. - С. 21.
- 95 Автоматическое управление вторичным охлаждением сляба в машине непрерывного литья заготовок / В.А. Кранов, С.В. Лукин, А.В.

- Полянский. // Вузовская наука - региону: Мат. VII всеросс. науч.-техн. конф. – Вологда: ВГТУ, 2009. – С. 190-192.
- 96 Мاستрюков Б.С. Теплофизика металлургических процессов. - М. :Изд-во МИСиС, 1996.-267 с.
- 97 Регулирование интенсивности вторичного охлаждения в машине непрерывного литья заготовок / М.А. Образцов, Шалкин А.П., С.В. Лукин и др. // Автоматизация и энергосбережения машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования: Мат. IV межд. науч.-техн. конф. Т. 2. – Вологда: ВоГТУ, 2008. – С. 46-48.
- 98 Настройка зоны вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок / П.В. Куликов, С.В. Лукин, Ю.А. Калягин и др. // Моделирование, оптимизация и интенсификация производственных процессов и систем: Мат. Межд. науч.-техн. конф. – Вологда: ВоГТУ, 2004. – С.92-96.
- 99 Черныш Н.К. Теория и расчёт идеальных вихревых устройств. - М.: Изд-во "Медисонт", 2010. - 370 с.
- 100 Промышленные форсунки и моющие головки Lechler. - URL: <http://promforsunki.ru/>, 2017.
- 101 Рубцов А.К., Парахина Е.Г., Гурко Н.А. Форсунка для систем испарительного охлаждения и увлажнения воздуха. // Научный журнал НИУ ИТМО, Санкт-Петербург. - 2016.- № 1.- С. 42-48.
- 102 Пажи Д.Г., Галустов В.С. Основы техники распыливания жидкостей. – М: Химия, 1984. – 256 с.
- 103 Смирнов А.Н., Куберский С.В., Штелан Е.В. Непрерывная разливка стали. - Донецк: ДонГТУ, 2011. - 482 с.
- 104 Липунов Ю.И. Регулируемое охлаждение как один из способов повышения прочностных характеристик стального проката и изделий из него. ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники». Методическое пособие - Екатеринбург, 2010. - С. 10.

Приложение А. Схема и характеристики круглофакельных форсунок фирмы Lechler



Volumenstrom Wasser $\dot{V}_W = 0,9$ l/min bei 1,5 bar minimum
 FLOW RATE WATER $\dot{V}_W = 0,9$ L/MIN AT 1,5 BAR MINIMUM
 Volumenstrom Wasser $\dot{V}_W = 3,4$ l/min bei 6,5 bar maximum
 FLOW RATE WATER $\dot{V}_W = 3,4$ L/MIN AT 6,5 BAR MAXIMUM
 Volumenstrom Luft $\dot{V}_{LN} = 4,0$ m³/h bei 2 bar maximum
 FLOW RATE AIR $\dot{V}_{LN} = 4,0$ M³/H AT 2 BAR MAXIMUM
 Gewicht / WEIGHT = 0,74 kg

parabelförmige Flüssigkeitsverteilung
 PARABOLIC DISTRIBUTION OF SPRAY

Strahlwinkel $\alpha = 60^\circ$
 SPRAY ANGLE $\alpha = 60^\circ$

Abmessungen in mm
 DIMENSIONS IN MM
 2007-Juni-19-MR-MUAL

