

В.А.Емельянов

ТЕПЛОВАЯ РАБОТА МАШИН НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК

Допущено Министерством высшего и среднего
специального образования СССР
в качестве учебного пособия для студентов
вузов, обучающихся по специальности
"Металлургия черных металлов"



МОСКВА
"МЕТАЛЛУРГИЯ"
1988

Рецензенты: докт. техн. наук Д. П. Евтеев, кафедра теплоэнергетики
и металлургических печей Ждановского металлургического института

Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок. Е мельянов В. А. Учебн.
пособие для вузов. М.: Металлургия, 1988, 143 с.

Обобщены и систематизированы материалы о конструкциях, технологиях и тепловой работе машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Приведены результаты экспериментальных и расчетно-теоретических исследований, изложены рекомендации по совершенствованию тепловой работы МНЛЗ, основные принципы и методы теплотехнических расчетов, в том числе с применением ЭВМ. Освещены вопросы непрерывной разливки, связанные с тепловой работой основных технологических узлов, кристаллизатора и системы вторичного охлаждения.

Для студентов, обучающихся по специальности "Металлургия черных металлов"

Ил. 44. Библиогр. список: 8 назв.

E 2602000000-017 42-88
040(01)-88

ISBN 5-229-00046-5

© Издательство "Металлургия", 1988

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Глава 1. МНЛЗ как объект исследования и проектирования.	5
§ 1. Место непрерывной разливки стали в металлургическом цикле	5
§ 2. Технология непрерывной разливки стали	6
§ 3. Конструкции МНЛЗ	14
§ 4. Задачи проектирования МНЛЗ	21
§ 5. Основы применения САПР	24
Глава 2. Теплотехнические процессы при непрерывной разливке стали.	28
§ 1. Роль тепловых процессов	28
§ 2. Теплотехнические особенности работы МНЛЗ	30
§ 3. Оптимальные тепловые режимы	33
§ 4. Задачи и методы теплотехнических исследований	37
Глава 3. Теплотехнические процессы в кристаллизаторе.	41
§ 1. Принцип работы кристаллизатора	41
§ 2. Теплообмен в кристаллизаторе	47
§ 3. Методы и результаты исследований кристаллизатора	56
§ 4. Методика теплового расчета кристаллизатора	65
Глава 4. Зона вторичного охлаждения	70
§ 1. Принцип работы ЗВО	70
§ 2. Теплообмен в ЗВО	77
§ 3. Методы и результаты исследования ЗВО	88
§ 4. Методика теплового расчета ЗВО	100
Глава 5. Затвердевание непрерывных слитков	110
§ 1. Теплофизические особенности затвердевания металлов.	110
§ 2. Методы исследования процесса затвердевания	114
§ 3. Методика численного решения задач затвердевания с применением ЭВМ.	121
§ 4. Результаты расчетно-теоретических исследований с помощью ЭВМ.	124
Рекомендательный библиографический список	142

ВВЕДЕНИЕ

В решениях XXVII съезда КПСС намечена программа ускорения научно-технического прогресса. Предусматривается дальнейшее развитие металлургии, повышение производительности и эффективности металлургических агрегатов, улучшение качества и расширение сортамента металлопродукции, указывается на необходимость более быстрого технического перевооружения производства, создание и выпуск машин и оборудования, позволяющих использовать в широких масштабах высокопроизводительные, энерго- и материалосберегающие технологии. Практическое решение этих задач в значительной мере зависит от внедрения и освоения новых, прогрессивных методов.

Одним из новых решений в металлургии является прогрессивный метод непрерывной разливки стали, который позволяет значительно повысить выход годного и улучшить качество металла, а также облегчает механизацию и автоматизацию процесса разливки.

В последние годы метод непрерывной разливки стали получил большое распространение. К 1990 г. разливка стали непрерывным способом составит более 50 % всей выплавляемой в мире стали. На Новолипецком металлургическом комбинате впервые в мировой практике вся сталь, выплавляемая в большегрузных конвертерах, разливается непрерывным способом, вводятся в строй новые машины непрерывной разливки стали на многих заводах нашей страны.

Успешное решение новых задач увеличения объема разливки стали на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) с одновременным расширением сортамента и повышением качества отливаемых заготовок невозможно без теплотехнического обоснования режимов работы МНЛЗ, так как качество литого металла определяется, в основном, рациональной организацией теплоотвода от слитка в процессе его затвердевания.

При изучении специальных дисциплин студенты должны овладеть не только теорией, но и методами расчета основных теплотехнических процессов, поэтому в данном учебном пособии рассматриваются теоретические и практические вопросы совершенствования МНЛЗ, подробно анализируются теплотехнические особенности работы кристаллизатора и зоны вторичного охлаждения, приводятся основные расчетные формулы.

В Липецком политехническом институте в течение нескольких лет ведется целевая подготовка инженеров-металлургов для НЛМК, накоплен многолетний опыт преподавания и проведения научных исследований по теплотехнике непрерывной разливки стали, который использован при написании данного учебного пособия.

Автор выражает глубокую благодарность за сотрудничество и большую помощь в совместной работе кандидатам технических наук Е. И. Ермоловой, Л. И. Урбановичу, О. Н. Ермакову, В. И. Дождикову, А. П. Гире и другим сотрудникам Липецкого политехнического института.

Глава 1. МНЛЗ КАК ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ

§ 1. МЕСТО НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ЦИКЛЕ

Разливка стали и ее затвердевание являются завершающими звенями в цепи основного металлургического процесса. Однако старые методы разливки стали в изложницах весьма малопроизводительны и являются препятствием к механизации и автоматизации всего металлургического цикла.

В 50-е годы в нашей стране на заводе "Красное Сормово" впервые в мире начато промышленное внедрение нового, прогрессивного метода непрерывной разливки стали, который значительно сокращает цикл металлургического производства. Применение непрерывной разливки стали в сочетании с кислородными конвертерами большой единичной мощности создает возможность для осуществления полной поточности металлургического производства.

Внедрение непрерывной разливки стали идет сравнительно быстрыми темпами. Если в 1960 г. непрерывным способом было разлито лишь 1,65 млн.т, что составило менее 0,5 % от общей выплавки, то в настоящее время во всем мире действует более 600 МНЛЗ, на которых разливается более 210 млн.т или ~30 % всей мировой выплавки стали.

Непрерывная разливка стали широко применяется за рубежом в таких промышленно-развитых странах, как США, Япония, Италия, ФРГ и др.

В нашей стране сейчас разливается на МНЛЗ более 30 млн.т стали в год, планируется дальнейшее расширение непрерывной разливки.

В будущем производство стали с затвердеванием в традиционной изложнице, очевидно, будет ограничиваться только теми случаями, когда непрерывная разливка не может быть применена.

Установка непрерывной разливки заменяет в действительности следующие стадии металлургического производства: разливку в изложницах, затвердевание слитков, их стрипперование, нагрев в колодцевых печах, первичное обжатие и вводят вместо них единственную стадию непрерывной заливки стали в кристаллизатор, сечение которого соответствует необходимому сечению заготовки, и непрерывное вытягивание затвердевшей заготовки из машины.

Таким образом, непрерывная разливка является таким процессом, который превращает жидкую сталь из ковша непосредственно в заготовку любого сечения.

В нашей стране уже работают несколько металлургических заводов и кислородно-конвертерных цехов, где вся выплавляемая сталь разливается на МНЛЗ. Например, Новолипецкий металлургический комбинат, кислородно-конвертерный цех Ждановского металлургического комбината "Лизовстали" и др.

Широкое применение непрерывной разливки стали обусловлено рядом существенных преимуществ перед старым способом разливки в изложнице. Это прежде всего уменьшение капитальных затрат примерно на 30 % за счет отсутствия обжимных станов и отделения нагревательных колодцев. При использовании непрерывной разливки стали достигается повышение производительности труда на 15 – 25 % в результате механизации производства, происходит улучшение качества непрерывных слитков и структуры металла. Например, повышается степень однородности слитка, качество поверхности, уменьшается осевая рыхлость слитка и т.д. Выход годного увеличивается на 10 – 15 %, а при разливке легированных сталей на 15 – 20 % по сравнению с разливкой в изложнице и доходит до 96 % и более.

Непрерывная разливка стали обеспечивает поточность производства и предоставляет хорошие возможности для комплексной механизации и полной автоматизации процесса разливки при непрерывном характере процесса и большом массовом расходе металла.

Себестоимость 1 т проката непрерывного слитка из углеродистой стали на 3–5 руб. ниже по сравнению с обычным слитком; снижение себестоимости непрерывного слитка из высоколегированной стали достигает 20 руб. на 1 т.

При непрерывной разливке энергопотребление на 1 т стали снижается на 40 – 50 %, а иногда и до 80 %. По некоторым данным, например, для спокойной стали потребление энергии на 1 т сляба при таком способе разливки в 4 раза ниже, чем при разливке в изложнице.

При непрерывной разливке достигается значительное улучшение организации производства, условий труда и окружающей среды.

Эти основные преимущества создают предпосылки для дальнейшего развития способа непрерывной разливки стали и полной замены старого способа разливки в изложнице в ближайшем будущем.

Наиболее полно эффективность непрерывной разливки выявляется на заводах, где вся выплавленная сталь разливается на МНЛЗ.

§ 2. ТЕХНОЛОГИЯ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ

Технология непрерывной разливки стали интенсивно разрабатывается в течение последних лет в нашей стране и за рубежом.

Этот способ состоит в том, что жидкий металл непрерывно заливается в верхнюю часть водоохлаждаемой формы – кристаллизатор, постепенно затвердевает и охлаждается, проходя вдоль всей технологической оси.

Основными узлами машин непрерывного литья заготовок являются охлаждаемый кристаллизатор или формообразователь, зона вторичного охлаждения слитка (ЗВО), поддерживающая система, тянувшее устройство и механизмы для разделения и транспортировки слитков.

Принцип работы МНЛЗ рассмотрим на примере криволинейной машины, конструктивная схема которой показана на рис. 1. Жидкая сталь из разливочного ковша поступает в промежуточный ковш (1), который предназначен для снижения и стабилизации ферростатического давления и динамического напора струи, отделения шлака и стабилизации температуры перед кристаллизатором. Промежуточный ковш также распределяет металл в кристаллизаторы в зависимости от количества ручьев. Далее сталь попадает в водоохлаждаемый кристаллизатор (2), где происходит начальное формирование непрерывного слитка. Перед началом разливки в кристаллизатор вводят так называемую затравку, которая является дном кристаллизатора на начальной стадии разливки.

Сформировавшийся в кристаллизаторе слиток с затвердевшей оболочкой попадает в зону вторичного охлаждения (3), где проводится его дальнейшее охлаждение с помощью водяных форсунок (4) или другими способами. Для предохранения слитка от увеличения объема зона вторичного охлаждения оборудуется специальной поддерживающей системой (5) в виде роликов, брусьев и др. Затем слиток проходит через тянувшую клеть (6) и попадает в зону резки (7).

Принципиальные схемы непрерывной разливки отличаются положением продольной технологической оси кристаллизующегося слитка, однако основы технологии разливки являются общими для всех типов машин.

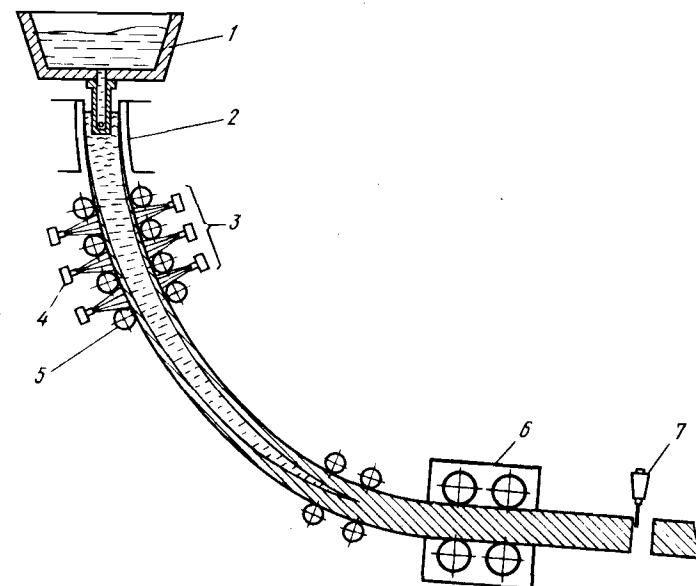


Рис. 1. Схема криволинейной МНЛЗ

Жидкая сталь поступает в разливоочное отделение при $t = 1560 - 1580^{\circ}\text{C}$. Из сталеразливочного металла подается в промежуточный ковш, предварительно нагретый до 1100°C .

Если принять температуру кристаллизации $t_{\text{кр}}$ для большинства сталей $\sim 1500^{\circ}\text{C}$, то в промежуточный ковш сталь должна поступать с небольшим перегревом. Обычно температура стали в промковше поддерживается на уровне $1540 - 1560^{\circ}\text{C}$, что обеспечивает удовлетворительное качество поверхности слитков и стабильность процесса разливки. Однако с повышением температуры металла более 1570°C возрастает пораженность слитков наружными продольными и поперечными трещинами.

Для обеспечения стабильности процесса разливки температура металла в кристаллизаторе должна быть на $15 - 20^{\circ}\text{C}$ выше температуры затвердевания, однако по условиям качества слитка перегрев Δt должен быть не более 30°C .

В кристаллизаторе за счет интенсивного охлаждения по периметру слитка затвердеваются поверхностные слои металла, образуя твердую корочку или оболочку слитка. Внутри слитка по центральной оси сохраняется жидкая фаза. Стальная заготовка формируется в соответствии с формой и размерами кристаллизатора. Застывшая в кристаллизаторе сталь сцепляется с затравкой, а образующийся слиток вытягивается вниз с помощью тянувших клетей.

Для предотвращения прилипания жидкой стали к стенке кристаллизатора предусмотрен механизм качания. Кристаллизатор совершает возвратно-поступательное движение с заданной частотой качания, а в зазор между стенкой кристаллизатора и поверхностью слитка подается специальная смазка.

Толщина затвердевшей корочки на выходе из кристаллизатора должна быть $\geq (25 \div 30)$ мм, чтобы обеспечить достаточную механическую прочность вытягиваемой заготовки и исключить возможность прорыва жидкого металла. По некоторым зарубежным данным толщина корочки должна быть $\geq (15 \div 25)$ мм в зависимости от размеров заготовки.

Температура поверхности слитка на выходе из кристаллизатора составляет $\leq (1100 - 1200)^{\circ}\text{C}$ при средней температуре корочки $\sim (1300 \div 1350)^{\circ}\text{C}$. Прочность такой корочки достаточно, чтобы противостоять силам трения и действия ферростатического давления жидкого металла.

Слиток с затвердевшей корочкой, попадающий из кристаллизатора в зону вторичного охлаждения, в результате форсированного поверхностного охлаждения затвердевает по всему сечению. Форма слитка сохраняется за счет специальной поддерживающей системы (роликовой, брусьевой и др.). После прекращения подачи воды слиток охлаждается на воздухе.

В конце зоны вторичного охлаждения температура поверхности (t_n) слитка снижается до уровня $800 \div 900^{\circ}\text{C}$. Слиток принудительно вытягивается с помощью тянувших клетей, а затем поступает в газорезку,

где разрезается на мерные куски заданной длины. Далее заготовки по рольгангу транспортируются на склад.

Успешное внедрение способа непрерывной разливки стали в металлургической промышленности стало возможным только после разработки устойчивого процесса разливки, обеспечивающего стабильное металлургическое производство и получение высококачественной продукции из литых заготовок.

На основании многолетнего опыта определены главные условия для получения устойчивого технологического процесса непрерывной разливки стали:

- равномерное распределение металла при подводе в кристаллизатор;
- разливка в оптимальных температурных интервалах;
- обеспечение симметричности кристаллизации и формирования структуры заготовки, а также необходимой толщины корочки;
- вытягивание с заданной постоянной скоростью;
- полное затвердевание в зоне вторичного охлаждения;
- широкая механизация и автоматизация работы МНЛЗ и др.

При проектировании новых промышленных установок основное внимание уделяется дальнейшему повышению эксплуатационных качеств и надежности работы всех узлов технологического и теплотехнического оборудования, сокращению времени на подготовку, перестройку машины для отливки другого профиля.

Установлены главные технологические факторы, обеспечивающие получение слитков высокого качества: температура жидкой стали, скорость разливки и режим вторичного охлаждения.

Температура жидкой стали – важный технологический фактор, влияющий на процесс и качество непрерывного слитка. При недостаточном перегреве снижается жидкотекучесть стали и затрудняются условия разливки, а значительный перегрев ведет к образованию внутренних трещин и увеличивает осевую усадочную пористость слитка. Поэтому одна из технологических задач – поддержание строгого температурного режима процесса непрерывной разливки стали.

Основными регулируемыми параметрами технологического процесса непрерывной разливки являются скорость разливки и интенсивность охлаждения слитка.

Скорость разливки (v) является важнейшим технологическим фактором, при неизменных физико-химических свойствах металла обеспечивающим главные технологические показатели – производительность и качество поверхности слитка. Скорость вытягивания зависит от размеров слитка и марки стали. Допустимая скорость разливки в значительной степени зависит от толщины корочки, ее способности выдержать ферростатическое давление и тянувшие усилия.

Повышение интенсивности охлаждения слитка способствует увеличению скорости разливки, но ограничивается возможностью появления

трещин вследствие возрастания термических напряжений. С увеличением скорости разливки увеличивается глубина жидкой лунки ($L_{ж}$) и, как следствие, возрастает ферростатическое давление на оболочку слитка, что представляет даже большую опасность, чем термические напряжения.

Серьезное внимание уделяется стабилизации процесса непрерывной разливки стали. Стабильная скорость разливки, постоянный уровень металла в кристаллизаторе — одни из главных технологических факторов, определяющих качество поверхности и центральной зоны слитка.

Эффективность работы МНЛЗ зависит, главным образом, от коэффициента ее использования, что обуславливает необходимость сокращения вспомогательного (нерабочего) времени. Значительная экономия времени может быть достигнута путем сведения к минимуму продолжительности подготовки при применении разливки так называемым последовательным методом "плавка на плавку", т.е. серийной разливки нескольких плавок.

Благодаря применению способа разливки "плавка на плавку" и таких усовершенствований как быстрая смена кристаллизатора и первой роликовой секции ЗВО, ускорение ввода заготовки коэффициент использования МНЛЗ вырос с 50 до 90 %.

Главными задачами дальнейшего улучшения технологии непрерывной разливки стали являются ускорение процесса затвердевания, а также получение качественных слитков.

Внедрение автоматического управления процессом разливки позволяет регулировать расход металла по уровню в кристаллизаторе в зависимости от скорости разливки, что также способствует повышению качества разливаемого металла. Повышение экономической эффективности непрерывной разливки может быть достигнуто за счет увеличения мощности установок и расширения сортамента разливаемых слитков.

В нашей стране непрерывным способом разливаются стали более 150 марок, в том числе углеродистые спокойные, низкоуглеродистые для получения автолиста и жести, низколегированные, электротехнические, высоколегированные стали и сплавы для производства листа и сортов.

Основная масса металла разливается в МНЛЗ на слабы и сортовые заготовки в кристаллизаторы прямоугольного сечения. По объему производства слабы составляют 50÷56, блюмы 16÷20, мелкосортные заготовки 28÷30 %. Сравнительно небольшая доля металла разливается на заготовки круглого сечения.

В настоящее время отливаются заготовки квадратного сечения с размерами от 80×80 до 370×370 мм, крупные сортовые заготовки с прямоугольным сечением (блюмы) с размерами до 320×450 мм. По литературным данным в Англии осваивается непрерывная разливка заготовок сечением 430×610. Диапазон сечений разливаемых слабов изменяется от 175×50 до 1750×250 мм, а на некоторых зарубежных заво-

дах до 2500×310. Длина крупных слабов достигает 10 м, а масса одного слаба до 30÷40 т.

В работе Д. П. Евтеева разливаемые стали разделены по маркам на 8 групп. Принцип деления сталей на группы, профиля и типоразмеры принят с учетом сложности освоения, которая определяется особенностью затвердевания и наиболее характерными дефектами, присущими данной группе слитков и сталей. Наибольшее распространение получила непрерывная разливка углеродистых спокойных сталей обычного качества, конструкционных и низколегированных сталей. В последнее время успешно осваивается непрерывная разливка инструментальных сталей, увеличивается количество разливаемых легированных сталей.

Развитие процесса непрерывной разливки на современном этапе осуществляется в следующих направлениях: повышение производительности МНЛЗ; улучшение качества непрерывных слитков; расширение области применения НРС и сортамента металла; совмещения НРС с прокаткой, автоматизации МНЛЗ и т.д.

Производительность является одним из главных технологических показателей работы МНЛЗ и зависит от сечения отливаемых слитков, скорости разливки, числа ручьев, применения разливки способом "плавка на плавку", времени, затрачиваемого на подготовку машины к работе.

Производительность МНЛЗ для одного ручья рассчитывается по формуле:

$$G = vF\rho_M 60,$$

где v — скорость разливки, м/мин; F — площадь поперечного сечения слитка, м^2 ; ρ_M — плотность металла, $\text{т}/\text{м}^3$.

Скорость непрерывной разливки лимитируется рядом ограничений, основными из которых являются напряжения вдоль непрерывного слитка, обусловленные силами трения в кристаллизаторе, напряжения, возникающие вследствие ферростатического давления, и термические напряжения, которые возрастают с ростом интенсивности охлаждения слитка. Поэтому фактически достигнутые в реальных условиях скорости непрерывной разливки в 2—3 раза ниже теоретически предельных скоростей. Для слабов больших сечений реально достигнуты скорости разливки в пределах 1,5÷2,0 м/мин. Для заготовки сечением 100×100 мм оказалась удовлетворительной скорость 3 м/мин, а для заготовки сечением 200×200 мм в зависимости от состава стали достигнуты скорости разливки в пределах 1,0÷1,5 м/мин.

В последнее время за рубежом начался новый этап развития процесса непрерывной разливки стали, главным направлением которого является уменьшение размеров поперечного сечения заготовок с целью приближения их к размерам сечения готового продукта. Исходной предпосылкой является сохранение достигнутой до настоящего времени

производительности МНЛЗ за счет увеличения скорости разливки пропорционально уменьшению толщины заготовки. Например, при непрерывной отливке сляба сечением 25 × 1500 мм скорость разливки должна составлять 15 м/мин, а уменьшение толщины того же сляба до 2,5 мм должно сопровождаться повышением скорости разливки до 150 м/мин и т.д. Аналогичные результаты рассчитывают получить и при непрерывной разливке в сортовые заготовки.

Скорость разливки должна устанавливаться прежде всего из условия прочности корочки металла, закристаллизовавшегося в процессе прохождения заготовки через кристаллизатор. Необоснованное превышение скорости разливки приводит к прорывам под действием ферростатического давления.

Скорости вытягивания слитка, затвердевания и глубина жидкой фазы являются важнейшими технологическими параметрами процесса непрерывной разливки стали. Одна из главных задач для технологов – установление взаимосвязи $L_{ж}$ от v , интенсивности охлаждения и марки стали (ее физических свойств).

Величина $L_{ж}$ при заданной скорости разливки определяет протяженность зоны вторичного охлаждения и всю высоту или технологическую длину установки.

В.С. Рутес на основании расчетов и экспериментов по определению времени затвердевания вертикальных непрерывных слитков приводит эмпирические формулы для определения длины жидкой фазы.

Для прямоугольных слябов шириной более 1200 мм $L_{ж} = 0,034 a^2 v$; для прямоугольных заготовок (слябов) шириной до 1200 мм $L_{ж} = 0,029 a^2 v$; для квадратных заготовок $L_{ж} = 0,024 a^2 v$, где a – толщина сляба или сторона квадрата, см; v – скорость разливки, м/мин.

Основным параметром, зависящим только от условий затвердевания непрерывной заготовки, является отношение длины жидкой фазы к толщине заготовки ($L_{ж}/a$).

С учетом того, что площадь поперечного сечения квадратной заготовки $F = a^2$, а для прямоугольных $F = \beta a^2$, где β – отношение сторон поперечного сечения, после некоторых преобразований для слябов шириной более 1200 мм $L_{ж}/a = 46(1 + \beta)/\beta$; для заготовок (слябов) шириной до 1200 мм $L_{ж}/a = 39(1 + \beta)/\beta$; для квадратных заготовок $L_{ж}/a = 64$.

Из этих формул следует, что $L_{ж}/a$ для непрерывных заготовок в десятки раз больше, чем для обычных слитков.

При таких высоких значениях отношения длины жидкой фазы к толщине непрерывнолитой заготовки очень важно определить наиболее выгодное положение продольной оси заготовки во время затвердевания, так как величина $L_{ж}/a$ оказывает влияние на протяженность технологической линии машины непрерывного литья заготовок (L_t), которая определяется выражением:

$$L_t = (h_p + L_{ж} + l_3) m_k,$$

где h_p – расстояние от уровня металла в сталеразливочном ковше до мениска металла в кристаллизаторе; l_3 – длина участка резки и длина мерной заготовки после порезки; $L_{ж}$ – длина жидкой фазы в затвердевшей заготовке; m_k – коэффициент, учитывающий некоторые конструкционные длины ($m_k = 1,0 \div 1,1$).

Величина h_p определяется высотой сталеразливочного и промежуточного ковшей и минимально необходимым расстоянием между ними и кристаллизатором. Величина l_3 зависит от способа резки и требований прокатного производства. Указанные величины не зависят от условий затвердевания.

Для радиальной МНЛЗ с радиусом изгиба R можно считать, что $L_{ж}$ равна четверти длины окружности, тогда $R = 2L_{ж}/\pi$.

Высота, занимаемая криволинейным слитком, равна радиусу, т.е. $H = R$, а строительная высота установки определяется как

$$H_{стр} = h_p + (2L_{ж}/\pi),$$

где h_p – расстояние от уровня металла в сталеразливочном ковше до мениска металла в кристаллизаторе.

При дальнейшем совершенствовании технологии непрерывной разливки должны совместно решаться две основные проблемы – повышение производительности и улучшение качества отливаемых слитков.

Повышение скорости вытягивания непрерывного слитка и увеличение интенсивности теплоотвода позволяют увеличить производительность, но с другой стороны это приводит к ухудшению качества слитка, появлению трещин и других дефектов.

В связи с повышением скоростей разливки стали, расширением марочного состава разливаемых сталей и повышением требований к качеству металла дальнейшее развитие и совершенствование технологии непрерывной разливки стали возможно на основе анализа причин возникновения основных дефектов и разработки практических мер по их устранению или предотвращению.

На основе опыта установлены основные факторы, влияющие на развитие дефектов: геометрические размеры слитка, конструкция кристаллизатора и состояние его рабочей поверхности; технологические условия выплавки и химический состав металла; условия разливки металла; тепловые режимы вторичного охлаждения.

Для получения заготовки хорошего качества требуется комплекс наиболее удачно сочетающихся мероприятий, каждое из которых предупреждает возникновение того или иного дефекта.

Одной из основных проблем повышения качества непрерывных слитков является вопрос об устранении или уменьшении различного рода трещин. Как показывают результаты многочисленных исследований, причиной появления и развития всех трещин являются напряжения в формирующемся непрерывном слитке, превышающие предел проч-

ности металла. Эти напряжения могут быть механического происхождения, когда они вызываются трением в кристаллизаторе, давлением опорных роликов, ферростатическим давлением, изгибом и выпрямлением слитка, усилиями вытягивания слитка, нарушениями механической настройки оборудования МНЛЗ и др.

С другой стороны, их причиной может быть изменяющееся во времени температурное поле оболочки слитка, вызывающее значительные температурные напряжения.

Многие исследователи прямо или косвенно связывают появление и развитие трещин в непрерывном слитке с условиями его охлаждения и даже считают их определяющими.

Наиболее полно механизм трещинообразования отражает теория, по которой появление трещин в непрерывном слитке связывается с напряженно-деформированным состоянием в его затвердевшей части, распределением температур и механическими свойствами стали в широком интервале температур.

Опытами установлено, что практически невозможен режим охлаждения, при котором отсутствовали бы напряжения. На практике может идти речь о минимальных величинах напряжений, не превышающих допустимых пределов.

Скорость разливки, оказыавшая значительное влияние на качество непрерывной заготовки, является функцией способности образовавшейся корочки сопротивляться различным напряжениям. А эта способность, в свою очередь, связана с условиями охлаждения и температурой стали.

При неправильной организации тепловых режимов охлаждения происходят скачкообразные изменения температуры поверхности слитка по его высоте и периметру, приводящие к возрастанию напряжений и нарушению сплошности металла.

Таким образом, внедрение и промышленное освоение совершенной технологии и новых конструкций МНЛЗ тесно связано с организацией протекающих в них тепловых процессов.

Поэтому исследование тепловых условий формирования непрерывного слитка при различных технологических факторах разливки является актуальной практической задачей.

Для дальнейшего продвижения вперед в освоении непрерывной разливки стали и повышении качества непрерывных отливок необходимо глубже изучить механизм, влияющий на процесс затвердевания, исследуя различные вопросы тепловой работы МНЛЗ.

§ 3. КОНСТРУКЦИИ МНЛЗ

Со времени возникновения идеи непрерывной разливки стали до ее практического осуществления прошло столетие. Современные машины непрерывного литья заготовок отличаются большим разнообразием и

выполняются по различным схемам, что объясняется длительным периодом разработок, проводимых во многих странах, а также многообразием задач, решаемых при получении непрерывнолитых заготовок разных форм и размеров, с разным технологическим назначением при дальнейшем переделе. Существенное значение имеют условия размещения установок на ограниченных площадках, при реконструкции старых цехов и заводов.

В связи с этим идет непрерывный поиск лучших конструкций машин непрерывного литья заготовок, совершенствуются отдельные узлы существующих установок. Во всех действующих установках металл разливается сверху. В последнее время проводятся изыскания по непрерывной разливке металла не сверху, а снизу.

Можно рассмотреть несколько основных принципов классификации конструкций МНЛЗ:

- по направлению технологической оси машины, т.е. по расположению выдаваемого в процессе литья непрерывного слитка;
- по назначению или сортаменту заготовок и вместимости сталеразливочных ковшей;
- по числу ручьев в одной машине и планировке.

Основные различия применяемых и разрабатываемых конструкций МНЛЗ состоят главным образом в расположении слитка в процессе литья. По этому признаку выделяют следующие основные типы МНЛЗ: вертикальные установки с резкой заготовок в вертикальном положении; вертикальные с изгибом заготовки; радиальные установки с постоянным радиусом изгиба заготовки; криволинейные с переменным радиусом изгиба; наклонные установки; горизонтальные установки.

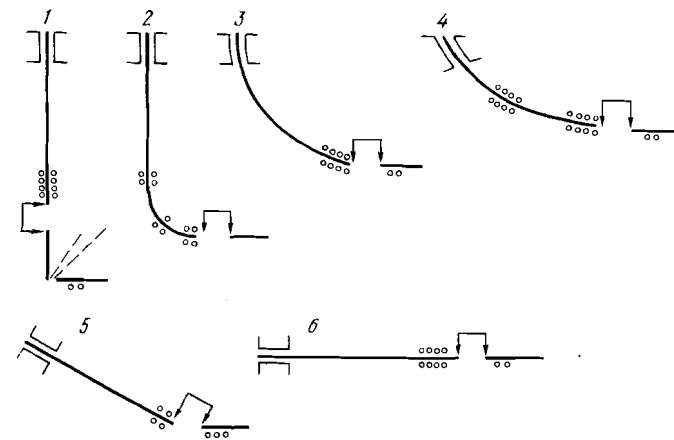


Рис. 2. Типы конструкций МНЛЗ

Перечисленные типы конструкций МНЛЗ схематично показаны на рис. 2.

Вертикальные установки (рис. 2, схема 1) с непрерывной подачей металла в кристаллизатор и вытягиванием слитка со скольжением корки получили наибольшее распространение в первый период освоения способа непрерывной разливки стали. Установки изготавливались с прямолинейным кристаллизатором и резкой слитков в вертикальном положении. С увеличением производительности такой установки возрастает ее высота. Наиболее крупные вертикальные МНЛЗ имеют высоту до 40–50 м. Сооружаются установки надземные, подземные и комбинированные.

Надземные МНЛЗ вертикального типа сооружаются в высокой башне, располагаемой над уровнем пола цеха. Преимуществами надземных установок являются простота выдачи слитков на уровень пола цеха, удобство обслуживания оборудования, хорошая вентиляция всей установки, естественный отвод воды. Недостатки надземных установок в трудности расположения в цехе высокой башни, большой высоте подъема ковша с жидким металлом.

Подземные вертикальные установки, чаще всего комбинированные, располагаются в глубоких колодцах под уровнем пола цеха. При расположении верхней части установки на площадке над уровнем цеха глубина колодцев достигает 25–30 м, что вызывает большие трудности при сооружении глубоких подземных колодцев.

Вертикальные МНЛЗ имеют широкое применение благодаря созданию наиболее благоприятных условий формирования качественных заготовок для широкого диапазона марок сталей, профилей и размеров слитков. В них обеспечивается наименьшее содержание различных включений в результате всплывания. Распределение включений более равномерное, чем на любой другой установке. Вследствие этого вертикальные машины наиболее универсальны по сортаменту разливаемых сталей и размерам заготовок.

Основным недостатком вертикальных МНЛЗ является их большая высота. Вертикальное расположение установки с подземным колодцем ограничивает возможности увеличения скорости разливки и мерной длины отливаемой заготовки. Чем выше скорость разливки, тем длиннее технологический путь непрерывной заготовки, поэтому при современных значениях скоростей высота вертикальных машин становится недопустимо большой.

Уменьшить высоту установки можно путем перевода слитка в горизонтальное положение. Благодаря этому фактору все остальные типы МНЛЗ по сравнению с вертикальным обладают преимуществами.

Вертикальные МНЛЗ с изгибом (рис. 2, схема 2) и выводом слитка перед резкой в горизонтальное положение позволяют уменьшить высоту установки.

Преимущества такого типа МНЛЗ заключаются в отсутствии колодца и, следовательно, снижении капитальных затрат, поскольку слиток рождается на горизонтальной плоскости и все операции упрощаются.

Основным недостатком таких установок является двойная деформация слитка при изгибе и распрямлении, поэтому в них затруднена разливка сталей, склонных к красноломкости.

Установки криволинейного типа (радиальные и криволинейные) получают в настоящее время все большее распространение, что объясняется, прежде всего, стремлением уменьшить строительную высоту машины.

В работах некоторых авторов объединяются понятия "радиальные" и "криволинейные", в других же работах эти понятия рассматриваются отдельно. Для более четкой классификации представляется целесообразным разделить эти понятия и рассматривать отдельно особенности каждого типа.

Радиальными (рис. 2, схема 3) называются такие установки, в которых отливаемая заготовка в течение всего периода затвердевания проходит дугу определенного радиуса кривизны и выпрямляется одностадийно после полного затвердевания. Кристаллизатор, где формируется непрерывная заготовка, также имеет изгиб под определенным радиусом. Формировавшийся в нем изогнутый слиток продолжает двигаться по дуге того же радиуса, что и радиус изгиба кристаллизатора, а затем выпрямляется в тянущеправильном механизме и выдается на горизонтальный рольганг, где его режут на мерные заготовки. Вывод на горизонтальный участок происходит в результате одной операции – выпрямления. В радиальных установках не происходит никакой деформации заготовки до полного ее затвердевания, так как заготовка движется по дуге окружности. Деформация (распрямление) происходит в одной точке после полного затвердевания заготовки.

Криволинейными (рис. 2, схема 4) называются установки, в которых кривая, описывающая профиль продольной оси отливаемой заготовки, имеет переменный радиус. В этих машинах происходит многостадийная деформация оболочки неподвижностью затвердевшей заготовки. Установки имеют, как правило, радиальный кристаллизатор. Особенностью криволинейных машин является разгиб слитка в нескольких точках по переменному радиусу, что позволяет более плавно приводить слиток в горизонтальное положение и улучшить тем самым его качество. Жидкая фаза здесь может доходить до горизонтального участка. На машинах криволинейного типа разливаются слябы больших размеров и значительной толщины (до 300–350 мм).

В криволинейных машинах достигается дальнейшее снижение высоты установки по сравнению с вертикальными и радиальными.

Для многих сталей непрерывные слитки, полученные на радиальных и криволинейных машинах, не уступают по качеству вертикальным. Однако в ряде случаев при установке радиальных кристаллизаторов

наблюдается асимметричность затвердевания, односторонняя ликвация по малому радиусу.

В последнее время получают распространение МНЛЗ нового типа, на которых первоначальная оболочка слитка формируется в вертикальном кристаллизаторе, а затем отливаемой заготовке придается профиль кривой с переменным радиусом кривизны.

В установках с вертикальным (прямолинейным) кристаллизатором и прогрессивным способом выпрямления слитка совмещаются преимущества вертикальных и криволинейных машин. Вследствие симметричности затвердевания корочки в вертикальном кристаллизаторе улучшается качество слитка. Выравнивание фронта кристаллизации существенно снижает вероятность прорыва и создает возможность увеличения скорости разливки. МНЛЗ нового типа обеспечивает постоянную скорость деформации, что снижает напряжения в корочке слитка, а также способствует повышению скорости разливки.

Применяются радиальные или криволинейные установки с различным углом наклона кристаллизатора к горизонту.

В установках криволинейного типа происходит многоступенчатая деформация неполностью затвердевшей заготовки. Теоретически затвердевающая заготовка имеет профиль параболы, гиперболы или клоноиды, практически же профиль заготовки по длине состоит из определенного числа радиальных участков с различными радиусами кривизны. Профиль кривой выбирают таким образом, чтобы оболочка слитка испытывала только минимальные деформации, снижающие вероятность появления внутренних трещин в слитке. Выпрямление отливаемой заготовки в ряде случаев происходит до окончания полного ее затвердевания.

При выборе варианта криволинейной МНЛЗ обычно учитывают сортамент отливаемых заготовок и марки сталей.

Установки криволинейного типа являются весьма перспективными благодаря следующим преимуществам:

- высота криволинейных машин снижается в 3–4 раза по сравнению с вертикальными, для их размещения не требуется строить глубокие колодцы или громоздкие здания разливочных пролетов;

- капитальные затраты на их строительство значительно снижаются по сравнению с вертикальными;

- все оборудование доступно грузоподъемным средствам и удобно для обслуживания;

- практически неограниченная длина зоны вторичного охлаждения позволяет примерно на 25 % увеличить скорость разливки без увеличения высоты установки;

- возможность получения неограниченных по длине заготовок, что важно для повышения производительности прокатных станов, так как большая мерная длина слитков соответствует современным требованиям к массе рулона (до 40 т);

— возможность совмещения МНЛЗ с прокатным станом в единый непрерывный технологический агрегат;

- низкое ферростатическое давление в незатвердевшей части слитка;
- снижение массы технологического оборудования.

Основные недостатки МНЛЗ криволинейного типа:

- необходимость разгибания слитков, следовательно, невозможность разливать стали, склонные к горячим трещинам, а также сложность отливки слитков толщиной более 350 мм;

- сравнительно большая площадь для размещения в цехе;

- возможность размыкания корочки по наружному радиусу криволинейного кристаллизатора струей металла;

- односторонняя ликвация, смещенная в сторону малого радиуса в результате асимметричного затвердевания в криволинейном кристаллизаторе.

Однако последние два недостатка устраняются при применении вертикального кристаллизатора и специальных конструкций погружных станов.

Наклонные МНЛЗ (рис. 2, схема 5) существуют, в основном, конвейерного типа. В них происходит совместное движение кристаллизатора и слитка без скольжения корочки, т.е. нет перемещения слитка относительно кристаллизатора. Основным узлом являются два конвейера, наклоненные под углом 10–30° к горизонту и размещенные один над другим.

Полуизложницы верхнего и нижнего конвейера при смыкании образуют канал (кристаллизатор) длиной несколько метров с соответствующим профилем. Жидкая сталь из ковша направляется в промежуточное разливочное устройство с хоботом, входящим в канал кристаллизатора. Слиток с жидкой сердцевиной после кристаллизатора охлаждается водой и затем разрезается.

Преимущества наклонных МНЛЗ:

- небольшая высота и низкие капитальные затраты;
- высокая скорость и производительность, превышающая в несколько раз производительность МНЛЗ, работающих со скольжением корочки. Например, при отливке квадратной заготовки сечением со стороной 120–140 мм достигается скорость разливки 5 м/мин;
- возможность совмещения с прокаткой.

Недостатки:

- неравномерность затвердевания, несимметричность структуры слитков.

Горизонтальные МНЛЗ (рис. 2, схема 6) с водоохлаждаемым медным кристаллизатором и вытягиванием слитка со скольжением корочки. Вначале они применялись для разливки чугуна и цветных металлов. В последнее время успешно осваивается разливка сталей на горизонтальных установках, применение которых в дальнейшем будет повышаться.

В работах советских и зарубежных авторов отмечается тенденция расширения сортамента сталей, использования горизонтальных МНЛЗ для получения заготовок из высоколегированных и нержавеющих сталей, показано, что качество внутренней структуры заготовок с горизонтальными МНЛЗ часто не уступает качеству заготовок, полученных на других установках. На горизонтальных МНЛЗ получают заготовки с мелкозернистой структурой, отмечается возможность дальнейшего повышения качества внутренней структуры слитков за счет регулирования охлаждения и помощью электромагнитного перемешивания.

Преимущества горизонтальных МНЛЗ:

- наибольшее сокращение высоты установки и капитальных затрат;
- закрытый подвод металла в кристаллизатор выгодно отличает ли-
тые заготовки с горизонтальных МНЛЗ по количеству неметаллических
включений;
- отсутствие деформации слитка.

Недостатки:

- неравномерное затвердевание и несимметричность структуры слит-
ков;
- нарушение процесса литья в результате прорывов металла из-за
трения о нижнюю грань кристаллизатора, что существенно ограничи-
вает производительность горизонтальных установок;
- образование трещин и ликвации в местах "затечивания" корочки
при циклическом вытягивании заготовки.

В последние годы у нас в стране и за рубежом горизонтальные уста-
новки получают все большее распространение. Активно ведутся работы
по дальнейшему совершенствованию их конструкций и технологии
разливки.

В зависимости от сортамента заготовок МНЛЗ можно разделить по
типу заготовок для дальнейшего передела – на слябовые, блюмовые
сортовые и трубные заготовки или по форме отливаемых заготовок
для прямоугольных, квадратных, круглых заготовок, специальных
профилей.

По количеству ручьев конструкции МНЛЗ разделяются в зависи-
мости от сортамента слитков и ряда технологических факторов.

Количество ручьев, принимаемое при проектировании установки
непрерывной разливки, выбирается таким образом, чтобы можно было
разлить всю содержащуюся в ковше сталь до того, как ее температура
опустится ниже допустимого уровня. Например, в слябовой машине не-
прерывного литья с двумя ручьями, обрабатываемой ковшом вмести-
мостью 200 – 300 т стали, требуется примерно один час для разливки
штабки в слябы толщиной 200 – 300 и шириной порядка 1500 – 2000 мм.

Для конкретного производства или цеха количество ручьев должно
определяться в зависимости от производительности цеха и каждой
установки, формы и размеров поперечного сечения заготовок, вмес-

тимости сталеплавильного агрегата и разливочного ковша, а также
от некоторых других технологических факторов.

Для разливки слябов применяются МНЛЗ с одним или двумя ручья-
ми, наибольшее распространение получили 2-х ручьевые слябовые уста-
новки.

При отливке блюмов обычно используются 2-х или 4-х ручьевые уста-
новки. Для блюмовых установок часто за счет увеличения количества
ручьев обеспечивается рост производительности.

Наибольшее количество ручьев (8) имеют сортовые установки в
некоторых зарубежных странах. Во многих странах строятся 6-ти ручь-
ьевые сортовые установки, а наибольшее распространение в последнее
время получают 4-х ручьевые сортовые машины.

Очевидно, не может быть универсальных машин непрерывного литья
заготовок. Каждый тип конструкции МНЛЗ имеет свою специфику,
отличительные черты и области применения, где лучше выявляются и
используются его преимущества.

4. ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МНЛЗ

Машина непрерывного литья заготовок со всеми вспомогательными
механизмами является производственной системой, которая входит в
состав сталеплавильного цеха и является его структурной единицей.
В технологической структуре цеха существует система взаимосвязан-
ных показателей количества и качества продукции.

Основной целью проектирования производственных систем и агрегатов
является достижение высокой производительности и обеспечение
необходимого качества выпускаемой продукции.

Исходя из общего производственного задания цеха определяется
мощность и производительность каждой структурной единицы. Провод-
ится оценка технического уровня данной производственной системы
и каждого технологического агрегата и оценка возможного качества
конечной продукции. Наличие множества путей для достижения цели
определяет возможность оптимизации результатов работы по задан-
ным критериям.

Для проектирования и анализа производственных систем особенно
важно и перспективно использование математических моделей, так
как они дают возможность аналитического исследования объектов, в
том числе с помощью ЭВМ.

При проектировании задаются основные параметры на входе и выхо-
де, известны основные закономерности и уравнения связи, но нет кон-
струкции.

Задача. Необходимо спроектировать производственную систему.

Проект новой установки дает ответ на вопросы какой должна быть
новая техническая система, а также как ее реализовать практически.

На практике при выборе окончательного проектного решения не всегда однозначно решается вопрос о принципе оценки эффективности рассматриваемых вариантов и об оптимальности принятого проектного решения.

В настоящее время необходимо решать задачу оптимального проектирования системы охлаждения МНЛЗ, т.е. выбора конструкции и режимов. Для этого успешно применяется метод математического моделирования, который дает возможность прогнозирования и оптимизации некоторых показателей качества слитка на основе расчета его температурного поля, режимов охлаждения и др.

При обосновании исходных данных рассматривается совокупность внешних факторов и требований, влияющих на исход оптимального проектирования:

- 1) целесообразные конструктивные схемы МНЛЗ;
- 2) существующая технология непрерывной разливки;
- 3) физико-математические модели затвердевания непрерывного слитка и граничные условия;
- 4) методика и результаты теоретических и экспериментальных исследований по совершенствованию процесса непрерывной разливки.

При проектировании новой системы необходимо учитывать следующие основные показатели: технического уровня проектируемой системы, стабильности ее работы, экономической эффективности и качества получаемой продукции.

Уровень качества определяется в сравнении с достигнутыми ранее результатами. Показатели качества могут быть единичными и комплексными (обобщенными).

Основные этапы проектирования МНЛЗ

1. По условиям технологии прокатки задается сортамент отливаемых заготовок, их форма и размеры, марки стали.

2. Для заданной производительности цеха определяется количество МНЛЗ, их производительность.

3. Для получения слитков заданного профиля и размеров из стали определенной марки выбирается тип конструкции МНЛЗ, который обеспечивает заданную производительность и необходимое качество заготовки. Количество ручьев зависит от вместимости ковша и размеров отливаемых сечений слитков.

4. Для заданной производительности машины выбирается скорость разливки. Поперечное сечение заготовки, скорость разливки и количество ручьев определяют производственную мощность каждой установки. При проектировании новой машины необходимо предусматривать возможность повышения скорости разливки не менее, чем на 30 %. В зависи-

мости от выбранной скорости вытягивания слитка рассчитывается длина зоны вторичного охлаждения (с перспективой ее возможного увеличения), определяется общая высота установки.

5. Для выбранного типа машины определяется конструктивное оформление важнейших технологических узлов – кристаллизатора, опорных устройств, системы охлаждения слитка в ЗВО и др. Рациональное конструктивное оформление отдельных узлов принимается на основе производственного опыта.

6. Для заданного конструктивного оформления МНЛЗ определяются основные режимные параметры, обеспечивающие необходимое качество слитков: температура стали, тепловой режим работы кристаллизатора, тип охлаждения и режимы охлаждения слитка в ЗВО (расходы воды, распределение ее по длине и периметру слитка и т.д.). Как показывает опыт, удовлетворительная работа МНЛЗ, высокое качество кристаллизующегося слитка зависят от правильного выбора конструкции системы ЗВО и режимов охлаждения.

7. Проводится расчет кристаллизации и затвердевания непрерывного слитка при заданных технологических и теплотехнических параметрах.

8. Разрабатывается система комплексной механизации и автоматизации процессов, управления режимами охлаждения.

9. Проводится технико-экономическое обоснование принятых технических решений, прорабатываются вопросы охраны труда.

Решение вопроса о выборе типа МНЛЗ связано с ролью процесса непрерывной разливки в общей производственной схеме цеха и завода. Для крупного металлургического комплекса с конвертерами большой мощности целесообразно выбрать конструкцию высокопроизводительной МНЛЗ с учетом возможности дальнейшего повышения производительности. Примером могут служить мощные установки криволинейного типа на НЛМК, комбинате "Азовсталь" и др.

При реконструкции, в условиях действующего цеха с ограниченной площадью целесообразнее выбрать МНЛЗ вертикального типа и т.д.

При проектировании необходимо определить комплекс режимных параметров, согласованных с выбранной конструкцией машины и ее узлов. Например, при необходимости повышения скорости разливки может потребоваться усовершенствование конструкции кристаллизатора и увеличение его длины для обеспечения достаточной прочности корочки, а также изменение длины ЗВО и режима охлаждения слитка.

Выбор системы ЗВО и способа охлаждения определяется размерами слитка, маркой стали и другими факторами.

При проектировании, прежде всего, используется накопленный опыт освоения и эксплуатации МНЛЗ, относящийся к конструктивным решениям и к режимным (технологическим) параметрам.

Наряду с этим проектирование МНЛЗ нового типа может основываться на результатах расчетно-теоретических исследований с помощью ма-

тематического моделирования, осуществляемого с применением численных методов и ЭЦВМ.

Использование математического моделирования открывает широкие возможности для прогнозирования направлений дальнейшего развития способа непрерывной разливки стали, расчета конструктивных элементов и режимных параметров при освоении новых марок сталей, профилей и размеров слитков, при повышении скорости разливки и т.д.

§ 5. ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ САПР

Системы автоматического проектирования (САПР) в последнее время находят все большее применение в инженерной практике. Сущность САПР и принципы построения определены ГОСТом 23501.0—79. САПР — это совокупность средств и методов для осуществления автоматизированного проектирования.

Составными структурными частями САПР являются подсистемы — выделенные и специализированные части, предназначенные для обслуживания проектных задач одного этапа проектирования.

Существует несколько элементов обеспечения САПР.

Методическое и организационное обеспечение

Техническое обеспечение — комплекс технических средств САПР, разделенный на несколько уровней. К верхнему уровню относятся ЭВМ большой производительности (например, ряда ЕС и пр.). Иногда проектировщик может решать отдельные задачи на ЭВМ второго уровня, в качестве которых используются мини-ЭВМ. В комплекс технических средств входят дисплеи, графопостроители и другие устройства; в последнее время созданы и широко применяются так называемые автоматизированные рабочие места проектировщика (АРМ).

Лингвистическое обеспечение предусматривает наличие необходимых языков программирования.

Математическое обеспечение САПР состоит из математических моделей объектов проектирования.

Информационное обеспечение САПР предусматривает наличие в памяти ЭВМ массива данных, необходимых для расчетов.

Программное обеспечение (ПО) связывает все остальные виды обеспечения САПР, оно подразделяется на общесистемное и специализированное. Общесистемное ПО выполняет общие функции: управление процессом вычислений, ввод, вывод и обработка информации и т.д. Основной функцией специализированного ПО является получение проектных решений.

По содержанию и назначению САПР разделяют задачи конструкторские и технологические.

Применительно к созданию САПР для установок непрерывной разливки стали надо исходить из конкретной специализации данной системы. В настоящее время задачи проектирования МНЛЗ считаются успешно решенными, если при заданной производительности качество металла удовлетворяет определенным нормативам.

САПР позволяет решать задачи выбора оптимальных проектных решений на строго научной основе. Одной из основных предпосылок создания САПР является наличие математического описания процессов. Математические модели применяются для разных уровней проектирования и имеют свою специфику.

Системное проектирование является самым верхним уровнем в САПР. Применительно к непрерывной разливке этот уровень соответствует функционированию МНЛЗ в условиях цеха. При этом надо рассматривать работу всего отделения непрерывной разливки как единую функционально связанную с конвертерным отделением, со складом готовой продукции и т.д. Поэтому системное проектирование связано с большими методическими трудностями при формулировке математических моделей для разных структурных подразделений и их взаимной увязке в единую систему.

Функциональное проектирование относится ко второму уровню. Поскольку в САПР применяется нисходящий принцип, то исходными данными для нижестоящего уровня проектирования являются результаты на вышеуказанным уровне.

Основным входным параметром для второго уровня проектирования является производительность МНЛЗ — выходной параметр системного проектирования. Главные задачи этого уровня связаны с проектированием различных функциональных частей машины — кристаллизатора и зоны вторичного охлаждения. Моделирование на этом уровне включает в себя несколько самостоятельных этапов: моделирование отдельных элементов или функциональных частей; моделирование работы всей машины в целом.

Уравнения математических моделей функциональных частей могут быть объединены в единую систему уравнений машины в целом. Как правило математические модели на этом уровне являются в общем случае системой обыкновенных дифференциальных уравнений, а в некоторых простых случаях — системой алгебраических уравнений. При проектировании МНЛЗ основой для математических моделей этого уровня являются уравнения теплового баланса, описывающие тепловую работу кристаллизатора и зоны вторичного охлаждения.

Компонентное проектирование относится к третьему уровню и предусматривает проектирование отдельных компонентов функциональных частей. На этом уровне можно, например, решать задачу оптимального

проектирования системы вторичного охлаждения (выбор конструкции и режима). Под решением понимается определенный выбор основных параметров, а оптимальным называется решение, которое по тем или иным соображениям предпочтительнее других. Процесс принятия решений находится в компетенции проектировщика системы. При проектировании ЗВО могут решаться конкретные задачи: разбивка ЗВО на отдельные секции охлаждения, подбор и расстановка форсунок в каждой секции ЗВО, определение расходов воды на секции и другие.

Каждый уровень проектирования может состоять из нескольких подуровней.

Первая особенность компонентного уровня проектирования состоит в применении распределенных математических моделей, выражаемых дифференциальными уравнениями в частных производных.

Вторая особенность заключается в наличии более тесной связи с конструкторскими и технологическими аспектами проектирования, чем на функциональном и системном уровнях.

Основные задачи, решаемые на компонентном уровне можно разделить на две группы.

Первая группа задач связана с проектированием физической структуры компонента. Для МНЛЗ это означает решение задачи об оптимальном распределении температуры поверхности и коэффициента теплоотдачи. Критерием оптимальности для этих задач является соответствующий функционал или группа функционалов температурного поля затвердевающего слитка.

Вторая группа задач связана с расчетом технологических параметров, обеспечивающих наилучшее приближение к заданному распределению температурного поля. Критерием оптимальности для этой группы задач может быть функция распределения температуры поверхности слитка, полученная на ранних этапах проектирования или по результатам проводимых исследований.

Основу математического обеспечения компонентного уровня проектирования составляют: математические модели компонентов проектируемого объекта (например, форсунок); математическая модель затвердевания непрерывного слитка, как модель обрабатываемой объектом заявки; численные методы решения уравнений в частных производных.

В качестве примера можно рассмотреть возможную схему алгоритма проектирования ЗВО.

Допустим, что известна математическая модель кристаллизатора, и, следовательно, известно температурное поле непрерывного слитка на входе в ЗВО. Кроме того, задана схема расстановки поддерживающих роликов. На основе математической модели ЗВО можно провести статистический анализ, выявить второстепенные параметры и характеристики разброса выходных параметров.

На первом этапе проектирования решается задача оптимизации температурного поля по поверхности слитка, а также определяются коэффициенты теплоотдачи. Температурное поле слитка может быть рассчитано на основе математической модели процесса затвердевания с применением ЭВМ. В качестве целевой функции используются сочетания функционалов температурного поля. На целевую функцию накладывается ряд ограничений, связанных как с требованиями повышения качества непрерывного слитка, так и с требованиями технологии непрерывной разливки. К таким требованиям можно отнести, например, постоянство температуры поверхности по периметру в каждом сечении слитка, монотонное снижение температуры поверхности по длине слитка до заданного значения в зоне разгиба и т.д.

На втором этапе решается задача подбора и расстановки форсунок, определения расхода воды (или водо-воздушной смеси) через каждую форсунку и на секцию ЗВО.

Проектирование может осуществляться по следующему алгоритму. Сначала проводится подбор и расстановка форсунок между парами соседних роликов. Температуры поверхности слитка на входе в очередной межроликовый промежуток (t_{II}') и на выходе из него (t_{II}'') известны из первого этапа проектирования. Управляющими параметрами при оптимизации являются расстояние до поверхности слитка h , число форсунок N , расход воды через форсунку $g_{\text{ф}}$. Отклонения от температуры t_{II}'' при выходе из межроликового промежутка контролируются (и штрафуются). Расход воды через форсунку $g_{\text{ф}}$ подбирается с условием возможности изменения его как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения, т.е. учитывается условие возможного изменения скорости разливки. Подбор типа форсунок проводится самим проектировщиком в режиме диалогового контакта с ЭВМ. Информация о каждом типе форсунок хранится в банке данных. ЭВМ в процессе оптимизации варьирует параметрами $g_{\text{ф}}$ и h с учетом ограничений на них. Найденные расходы воды для каждого ряда форсунок усредняются по секции ЗВО. После этого происходит коррекция воды на секцию ЗВО по тому же правилу контроля температуры поверхности слитка на выходе из секций. При этом должна учитываться устойчивость работы форсунок и другие практические условия.

Глава 2. ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКЕ СТАЛИ

§ 1. РОЛЬ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

На современном этапе непрерывную разливку стали нельзя рассматривать без учета явлений тепло- и массопереноса, поскольку этот процесс протекает при высоких температурах.

В ходе разливки необходимо обеспечить соответствующее охлаждение слитка для отвода физического тепла и скрытой теплоты плавления.

Рассмотрение вопросов теплофизики, тепло- и массопереноса в их тесной связи с технологией является основным звеном, определяющим все дальнейшие стороны интенсификации и оптимизации технологических процессов в непрерывной разливке стали.

Процесс охлаждения непрерывного слитка при его формировании из жидкой стали на МНЛЗ можно разделить на три стадии: первичное, вторичное и воздушное охлаждение.

Первичное охлаждение осуществляется в кристаллизаторе МНЛЗ, где образовавшаяся оболочка слитка контактирует с водоохлаждаемыми стенками кристаллизатора.

Вторичное охлаждение происходит в зоне вторичного охлаждения, где продолжается процесс затвердевания слитка.

Дальнейшее охлаждение происходит на участке остывания слитка на воздухе.

Имеются две основные проблемы, связанные с отводом тепла в ходе непрерывной разливки стали.

Первая проблема состоит в отводе от медного водоохлаждаемого кристаллизатора (первичное охлаждение) количества тепла, которое обеспечило бы образование твердой корочки определенной толщины для выдержки ферростатического давления жидкого металла в процессе разливки и вытягивания заготовки из кристаллизатора.

Вторая проблема состоит в отводе тепла, поступающего из внутренней жидкой зоны заготовки в условиях продолжающегося затвердевания в зоне вторичного охлаждения. Когда заготовка выходит из кристаллизатора, в жидкой сердцевине непрерывного слитка имеется еще большое количество тепла. Если не обеспечить быстрого охлаждения заготовки в ЗВО, то образовавшаяся твердая корочка может частично расплавиться вплоть до образования прорыва и вытекания жидкого металла.

Знание условий теплообмена и основных закономерностей позволяет определить толщину затвердевшей корочки на выходе из кристаллизатора, которая является решающим фактором для выбора скорости разливки при условии обеспечения достаточной прочности, а также выяснить причины образования некоторых дефектов непрерывного слитка — трещин, осевой рыхлости и др. Процессы теплообмена решают-

шим образом влияют на начало формирования твердой оболочки непрерывного слитка в кристаллизаторе и на получающуюся внутреннюю структуру металла в зоне вторичного охлаждения.

При изучении тепловой работы МНЛЗ и процесса кристаллизации непрерывного слитка необходимо определить взаимосвязь между важнейшими параметрами процесса — глубиной жидкой фазы, распространением фронта, скоростями кристаллизации и вытягивания слитка, а также количеством отводимого тепла и интенсивностью охлаждения.

Определяются также и согласующиеся между собой такие режимные параметры, как расходы воды в кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения, плотность орошения, распределение форсунок в ЗВО и др. Опыт эксплуатации промышленных установок непрерывной разливки стали показал, что дальнейшее совершенствование их конструкций, технологии и возможности получения качественных слитков в значительной мере зависит от совершенствования тепловой работы МНЛЗ, от возможностей управления процессами теплопередачи и затвердевания непрерывных слитков.

Сложная взаимосвязь явлений и многообразие факторов, влияющих на процесс формирования непрерывного слитка, ставят исследование теплопереноса при непрерывной разливке в ряд важнейших и актуальных задач теоретической теплотехники.

Освоение новых высокопроизводительных МНЛЗ, а также модернизация существующих установок требует всесторонних исследований влияния теплотехнических параметров на процесс формирования и охлаждения непрерывных слитков с целью выбора оптимальных (или рациональных) режимов, создания предпосылок получения высококачественного металла, уменьшения трещин и других дефектов в непрерывных отливках.

В последние годы в нашей стране ведутся интенсивные экспериментальные и расчетно-теоретические исследования по совершенствованию тепловой работы МНЛЗ, которые способствуют решению практических задач повышения производительности и увеличения выхода годного металла без увеличения количества установок. Значительный вклад в развитие непрерывной разливки внесли советские ученые М. С. Бойченко, В. С. Рутес, Д. П. Евтеев, В. Т. Сладкоштев, А. А. Скворцов, А. Д. Акименко, Ю. А. Самойлович и др.

Из зарубежных исследований можно отметить работы Б. Тармана, Д. Сэвиджа, Е. А. Мизикар, Э. Германа, многих японских исследований.

На основе проведенных исследований к настоящему времени по многим вопросам теплофизики непрерывного литья сложились достаточно четкие представления.

§ 2. ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ МНЛЗ

Процесс теплоотвода от слитка определяет важнейший технологический показатель – производительность машины непрерывного литья заготовок.

Для анализа тепловой работы высокотемпературных металлургических агрегатов часто применяют методику составления теплового баланса, с помощью которого можно оценить качество работы МНЛЗ как теплового агрегата.

Баланс может быть составлен для всей машины в целом или для ее отдельных зон (криSTALLизатор, ЗВО). Тепловой баланс дает наглядное представление о распределении количеств тепла в зависимости от технологических задач.

Сопоставление статей баланса для аналогичных машин позволяет провести сравнительный анализ их тепловой работы. Уравнение теплового баланса составляется на основе закона сохранения энергии. Обычно статьи баланса относят к единице времени или к единице массы металла.

Для МНЛЗ в качестве приходной статьи принимается количество тепла жидкого металла, поступающего в машину в единицу времени. В расходных статьях учитывается количество тепла, отводимое от слитка в отдельных зонах МНЛЗ, а также различные потери тепла.

Уравнение теплового баланса МНЛЗ записывается в следующем виде:

$$Q_m^h = Q_{kp} + Q_{vt} + Q_{voz} + Q_{pot} + Q_m^{ux},$$

где Q_m^h – начальное количество тепла, вносимое жидким металлом в машину (из промковша); Q_{kp} – тепло, отведенное в кристаллизаторе с охлаждающей водой; Q_{vt} – тепло, отведенное с охлаждающей водой и паром в зоне вторичного охлаждения; Q_{voz} – тепло, отводимое при охлаждении на воздухе (в пределах машины); Q_m^{ux} – тепло слитка, уходящего из машины; Q_{pot} – потери тепла в машине.

Общие потери складываются из потерь в кристаллизаторе и в зоне вторичного охлаждения: $Q_{pot} = Q_{pot}^{kp} + Q_{pot}^{vt}$, где Q_{pot}^{kp} – учитывает потери тепла в кристаллизаторе на излучение открытой поверхностью жидкого металла, от наружных стенок кристаллизатора, на начальный нагрев кристаллизатора; Q_{pot}^{vt} – учитывает потери тепла в зоне вторичного охлаждения на нагрев элементов конструкций поддерживающей системы, излучение и др.

Как показывает опыт, часть тепла затрачивается на нагрев кристаллизатора и поддерживающей системы только в начальный период работы машины. При длительной работе машины, например, при разливке металла методом "плавка на плавку", эти потери весьма незначительны. Обычно при исследовании тепловых процессов в МНЛЗ потерями тепла на нагрев оборудования пренебрегают вследствие их малой величины.

При составлении баланса не учитывается теплообмен вдоль оси слитка ввиду его незначительности.

На рис. 3 показана диаграмма распределения тепла вдоль технологической оси МНЛЗ.

Удельное количество тепла, поступающего в машину с жидким металлом, (или энтальпию) можно рассчитывать по формуле:

$$q_m = C_m (t_3^h - t_m^k) + q_{kp} + (C_j \Delta t),$$

где q_{kp} – скрытая теплота кристаллизации стали, кДж/кг; C_m и C_j – теплоемкость твердой и жидкой стали, кДж/кг·К; t_3^h – температура начала затвердевания, $^{\circ}\text{C}$; t_m^k – конечная температура стали, $^{\circ}\text{C}$; Δt – перегрев сверх температуры начала затвердевания, $^{\circ}\text{C}$.

Если принять величину скрытой теплоты кристаллизации для большинства сталей в пределах 270–275 кДж/кг, а величину перегрева металла $\Delta t = 20^{\circ}\text{C}$, то расчетное удельное количество тепла с жидким металлом составит ~ 1300 кДж/кг.

Полное количество тепла, поступающее в машину в единицу времени (или тепловой поток) $Q_m = Gq_m$, где G – производительность МНЛЗ, кг/с.

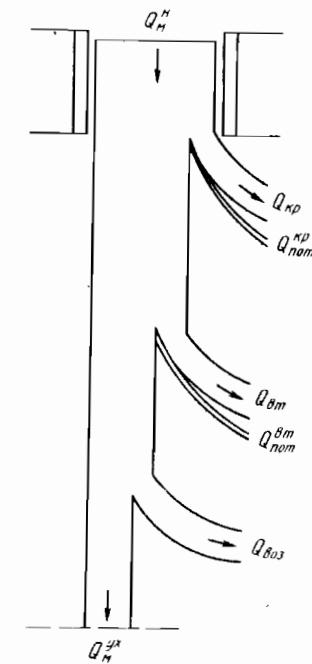


Рис. 3. Диаграмма теплового баланса МНЛЗ

Ниже приведен тепловой баланс МНЛЗ по результатам экспериментальных и расчетных данных многих авторов, из которого следует, что в пределах машины от слитка отводится $\sim 55\%$ тепла стали, а остальные 45 % тепла уходят из машины с горячим слитком.

Зоны МНЛЗ:	Удельное количество тепла, кДж/кг	Доля тепла, %
криSTALLизатор	210	16
зона вторичного охлаждения	320	25
воздушное охлаждение (до резки)	190	15
Итого:		
в машине	720	56
за машиной	580	44
Всего	1300	100

Из всего тепла, отнимаемого от металла в пределах машины, в кристаллизаторе отводится $\sim 20 \div 25\%$ тепла, 50 % в зоне вторичного охлаждения и в зоне воздушного охлаждения $\sim 25 \div 30\%$ тепла. По некоторым данным в крупных установках в ЗВО может отводиться до 70 % тепла.

Таким образом, в пределах установки основная доля тепла ($\sim 70\%$) отводится от слитка в зонах принудительного водяного охлаждения (в кристаллизаторе и ЗВО) и только менее 30 % отводится на воздухе за счет свободной конвекции и излучения.

Отсюда следует вывод о необходимости исследования тепловой работы кристаллизатора и ЗВО, а также разработка способов интенсификации и регулирования процессов теплообмена в этих зонах.

Анализ статей баланса позволяет выявить основные недостатки теплоиспользования и разработать меры по совершенствованию теплоизделийских процессов и улучшению всей тепловой работы МНЛЗ.

Работа МНЛЗ существенно зависит от организации теплоотвода по длине слитка. При этом важное значение имеют как конструктивные параметры (длина кристаллизатора и зоны вторичного охлаждения, вид вторичного охлаждения), так и требуемые расходы воды на охлаждение слитка.

При оценке теплоотвода из различных зон первоочередной задачей является определение требуемого расхода воды.

Величина расхода воды связывается с требуемым значением теплоотвода Q или плотности теплового потока q , перепада температур в кристаллизаторе или с величиной коэффициента теплоотдачи α в зоне вторичного охлаждения.

Для более глубокого анализа и учета особенностей теплообмена в МНЛЗ выделяют следующие характерные зоны охлаждения, для которых разработаны методы расчета.

Зона кристаллизатора, которая, в свою очередь, делится на две части. В верхней части кристаллизатора при наличии плотного контакта между корочкой слитка и стенкой кристаллизатора происходит передача тепла от жидкого металла к охлаждающей воде через стенку кристаллизатора. В нижней части кристаллизатора вследствие отхода затвердевшей корочки от стенки кристаллизатора происходит теплопередача от затвердевшей корочки к охлаждающей воде через газовый зазор и стенку кристаллизатора. При этом интенсивность процесса теплопередачи резко снижается.

Зона вторичного водяного охлаждения. Передача тепла от поверхности затвердевшей корочки слитка к охлаждающей воде происходит, в основном, за счет конвекции.

Зона охлаждения на воздухе. Охлаждение поверхности слитка в этой зоне протекает на воздухе в условиях свободной конвекции и излучения.

Величина теплоотвода в кристаллизаторе зависит от скорости разливки. Возможности увеличения теплоотъема практически ограничиваются поверхностью охлаждения слитка в кристаллизаторе.

В ЗВО количество отводимого от слитка тепла можно менять в значительно больших пределах путем изменения поверхности охлаждения, интенсивности и способа охлаждения.

Во всех зонах необходимо знать теплофизические особенности процесса формирования слитка, важно определить толщину корочки и глубину жидкой фазы, оценить оптимальные режимные и конструктивные параметры.

Расчетно-теоретический анализ основных закономерностей теплообмена позволяет прогнозировать развитие МНЛЗ и решать практические задачи повышения производительности установок и улучшения качества непрерывных слитков при переходе на другие размеры слитков и своеобразие непрерывной разливки новых марок стали.

Процессы теплопередачи и затвердевания необходимо изучать раздельно для каждой зоны из-за большого различия в физической сущности и интенсивности протекания процессов.

§ 3. ОПТИМАЛЬНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ

Одной из главных теоретических и практических задач является совершенствование технологического процесса, его оптимизация.

Разработка представлений об оптимальных условиях затвердевания металла и их практическая реализация выступают в этом плане конечной целью, достижение которой создает дополнительные возможности для увеличения производительности и повышения качества продукции.

Оптимизация процесса затвердевания слитка представляет сложную проблему, которая до настоящего времени еще находится в начальной стадии постановки и решения.

В решении проблемы оптимизации существуют два подхода.

1. Если современные знания о факторах, определяющих структуру и свойства затвердевающего металла, весьма ограничены, то идут по пути установления корреляционных связей между управляемыми параметрами на входе рассматриваемой системы и характеристиками качества готовой продукции на выходе.

Для непрерывной разливки стали при заданной производительности входными параметрами могут являться скорость разливки, температура металла в ковше, интенсивность теплоотвода в кристаллизаторе, ЗВО и др. Выходными параметрами должны являться наличие дефектов типа трещин, осевой рыхлости или пористости, количество неметаллических включений, параметры внутренней структуры металла, механические свойства и др. Связь между входными параметрами и характеристиками качества устанавливается на основе статистической обработки многочисленных экспериментальных исследований. Анализ проводится с помощью математической статистики.

При этом задача управления процессом сводится к тому, чтобы под-

держивать на оптимальном уровне значения тех входных параметров, которые в большей мере влияют на результирующие показатели.

Преимуществом данного подхода является то, что он обладает широкой общностью и может быть реализован без подробного знания конкретных процессов, протекающих в системе.

Однако данный метод, основанный на пассивной обработке статистического материала, может быть применен только для установившейся технологии. При изменении технологии необходимо снова накапливать экспериментальный материал.

Во время разработки новых промышленных установок такой пассивный метод может оказать весьма ограниченную помощь. Кроме того, установление связи между многочисленными факторами представляет значительную методическую трудность.

2. Второй подход основан на достаточно хорошо знании процессов, протекающих при затвердевании, и известном их математическом описании. Требования к качеству слитка формируются при этом в виде совокупности физических критериев, характеризующих конкретное физическое явление.

Задача оптимизации в этом случае состоит в поддержании на заданном оптимальном уровне значений основных физических параметров или главных критериев.

Этот активный метод обладает гибкостью в применении к меняющейся технологии, а также к задачам разработки и проектирования новых способов и агрегатов непрерывной разливки.

Практически важной и перспективной возможностью этого метода является прогнозирование основных технологических и теплотехнических параметров при изменении производительности, сортамента сталей или проектировании новых МНЛЗ.

Эффективным методом в решении задач оптимизации является математическое моделирование с использованием ЭВМ.

Формирование непрерывного слитка связано со множеством физических и химических явлений, которые зависят от конструкции МНЛЗ и, в значительной степени, от режима охлаждения слитка.

В связи с решающим влиянием тепловых процессов на затвердевание металла при проектировании и исследованиях непрерывной разливки правомерно ставить вопрос об оптимизации тепловой работы МНЛЗ.

По мере развития конструкций МНЛЗ и совершенствования технологии непрерывного литья все большую актуальность приобретает проблема получения слитков с хорошими качественными характеристиками при одновременном обеспечении высокой производительности процесса.

Важной практической задачей является определение теплотехнических параметров и режима охлаждения непрерывных слитков, при которых была бы минимальной вероятность образования трещин в слитке.

Для освоения повышенных скоростей разливки и получения качест-

венных отливок необходимо всестороннее исследование теплофизических процессов при затвердевании непрерывного слитка, а также его напряженно-деформированного состояния с целью выбора оптимальных тепловых режимов в зависимости от различных параметров непрерывной разливки. В связи с большими трудностями выбора эффективных и поддающихся расчету критериев до настоящего времени еще не создана достаточно общая и обоснованная методика расчета оптимальных режимов затвердевания непрерывных слитков.

Иногда исследователи решают задачи оптимизации для отдельных конкретных случаев, оценивают оптимальный режим охлаждения и дают рекомендации по его усовершенствованию на основании расчета величины термических напряжений. Очевидно, оптимальным можно считать такой тепловой режим, при котором обеспечивается максимальная скорость затвердевания, когда термические напряжения в слитке не превышают допустимых пределов, определяемых эмпирическим путем.

Однако вследствие сложности процессов и их математического описания комплексное решение задачи о напряженном состоянии затвердевающего непрерывного слитка с одновременным учетом усадочных, термических и механических напряжений встречает значительные трудности. Получение точного решения также затрудняется из-за недостатка данных по термомеханическим характеристикам сталей при высоких температурах. Имеющиеся в настоящее время математические модели напряженного состояния непрерывных слитков позволяют проводить качественное исследование режимов охлаждения, а также сравнительный анализ различных вариантов.

В работах многих авторов исследование условий формирования непрерывного слитка во всей их сложности заменяется исследованием только тепловой стороны процесса, которую известные математические модели описывают достаточно адекватно реальным условиям.

При оценке оптимальных режимов можно получить рекомендаций по улучшению качества непрерывных слитков на основании исследований температурного поля слитка, которым полностью определяются возможность возникновения и величина термических напряжений. Проблема улучшения качества рассматривается как задача оптимального управления температурным полем непрерывного слитка.

На основе анализа системы прямых показателей качества и содержащихся в литературе рекомендаций по их улучшению формулируются критерии оптимальности температурного поля слитка.

Экспериментальные и теоретические исследования по влиянию режимов охлаждения на качество непрерывного слитка позволили определить общие требования к охлаждению слитка. Обычно они формулируются в виде условий к температурному полю поверхности слитка.

Основные требования оптимального режима сформулированы Д. П. Евтеевым.

1. Монотонное снижение температуры поверхности слитка до окончания затвердевания.

2. Равномерное распределение температуры по периметру слитка.

3. Уровень температуры поверхности в конце ЗВО $\geq 800^{\circ}\text{C}$.

По некоторым зарубежным данным зона красноломкости находится в интервале температур $816 \div 900^{\circ}\text{C}$ или опасным считается интервал температур $700 \div 900^{\circ}\text{C}$.

Следовательно, для многих сталей наиболее целесообразной является температура поверхности в конце ЗВО более 900°C , что согласуется с условиями смягченного режима охлаждения.

Для МНЛЗ с изогнутой технологической осью накладывают дополнительные ограничения на температуру поверхности слитка в зоне его разгиба. Например, обеспечение температуры широких граней слитка в зоне разгиба $\sim 980^{\circ}\text{C}$ и температуры кромок $900 \div 930^{\circ}\text{C}$ позволило снизить количество поверхностных дефектов.

При освоении непрерывной разливки стали необходимо решить ряд основных практических вопросов.

Для заданного типа и конструктивного оформления машины определяются основные технологические и режимные параметры, которые обеспечивают заданную производительность и необходимое качество слитка.

Одними из важнейших факторов являются температура слитка и режим его охлаждения: расходы охлаждающей воды в кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения, распределение воды по длине и периметру непрерывного слитка.

Конкретное значение температуры поверхности слитка зависит от марки стали, скорости вытягивания слитка, конструктивных особенностей МНЛЗ и сечения слитка.

Не допускается резких изменений интенсивности теплоотвода, особенно значительного разогрева поверхности слитка. Необходимо также уменьшать градиенты температур по толщине корочки слитка и т.д. Во избежание прорывов охлаждение слитка под кристаллизатором, с одной стороны, должно быть достаточно интенсивным. Но, с другой стороны, при резком снижении температуры поверхности слитка под кристаллизатором возможно появление трещин вследствие больших термических напряжений.

Для сокращения горячих наружных трещин обращают внимание на равномерность теплоотвода от корочки слитка в начальный момент затвердевания.

Для предотвращения возникновения дефектов при разгибе необходимо обеспечить определенный уровень температур поверхности слитка в конце ЗВО.

В некоторых случаях рекомендуемые оптимальные режимы охлаждения разрабатываются исходя из условия предотвращения появления внутренних трещин.

Одна из важнейших производственных задач — повышение производительности, а, следовательно, скорости разливки до максимально возможной, при которой гарантируется определенный уровень качества слитков. Но при этом рост расхода воды в ЗВО, связанный с увеличением скорости, сопровождается повышением неравномерности распределения температур на поверхности слитка, увеличением термических напряжений, способствующих возникновению и развитию трещин.

Как показывает практика, невозможно полностью и одновременно удовлетворить все изложенные выше требования. Поэтому часто говорят об оптимальном режиме охлаждения, который давал бы минимальные отклонения от этих требований.

Дальнейшее улучшение качества непрерывных слитков, повышение стабильности и производительности МНЛЗ зависит в значительной мере от оптимизации процессов затвердевания и охлаждения слитков как в кристаллизаторе, так и в ЗВО, а следовательно, требует глубокого научного исследования теплотехнических вопросов на каждой стадии непрерывной разливки.

§ 4. ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для достижения высокой производительности МНЛЗ и получения качественных слитков необходимо установить связь технологии с тепловой работой машины. Исследовать тепловые условия формирования непрерывного слитка при различных технологических факторах разливки; изучить тепловые режимы в кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения, выявить влияние интенсивности охлаждения на качество слитка; провести теплотехническое обоснование оптимальных (или рациональных) режимов непрерывной разливки стали, так как от режимов охлаждения зависят надежность работы МНЛЗ и качество слитков.

Одной из важнейших задач исследования является определение зависимости процесса тепlop передачи и затвердевания от режимных, конструктивных и технологических факторов.

Необходимо также определить абсолютные значения тепловых потоков, коэффициентов теплоотдачи и тепlop передачи в разных зонах. Знание этих зависимостей необходимо для совершенствования тепловых режимов работы МНЛЗ.

Теплотехнические исследования проводятся по следующим основным направлениям: определение режимных параметров (скорости разливки, толщины корочки, глубины жидкой фазы, температуры поверхности слитка и др.); установление причин отклонения режима и теплотехнических параметров работы от проектных и приведение их к требуемому

уровню; установление оптимального теплового режима, прогнозирование основных теплотехнических и режимных параметров при изменении условий работы; разработка тепловых режимов и технологических карт: повторное обследование, сопоставление основных параметров и их корректировка, оценка качества непрерывных слитков.

Исследования теплотехнических вопросов работы МНЛЗ могут проводиться для решения практических задач улучшения конструкции и тепловой работы кристаллизатора, конструктивных схем и тепловых режимов зоны вторичного охлаждения; совершенствования структуры теплового баланса всей машины и ее отдельных зон, определения абсолютных значений теплоотвода, плотности теплового потока и др.; исследования температурного поля слитка, анализ процесса затвердевания с целью определения толщины твердой корочки, времени затвердевания, глубины жидкой фазы и др.; анализа напряженного состояния слитка и причин образования дефектов; разработки системы оптимального управления режимами охлаждения; энергетического анализа работы МНЛЗ с целью создания энергосберегающей технологии и экономии энергетических ресурсов.

При проведении научных исследований применяются два принципиально различных метода: экспериментальный и расчетно-теоретический. Однако в зависимости от задач и условий проведения исследований имеются разновидности этих методов, часто самостоятельно рассматриваются методы моделирования.

Для теплотехнических исследований процесса непрерывной разливки стали широко применяется экспериментальный метод, в рамках которого можно проводить промышленные и лабораторные эксперименты.

Наиболее достоверную информацию об изучаемых процессах можно получить при проведении экспериментов в производственных условиях непосредственно на действующем агрегате (промышленном образце). Однако в условиях работы высокотемпературных металлургических агрегатов проведение таких промышленных экспериментов связано со значительными трудностями. Поэтому при исследовании процесса непрерывной разливки метод промышленных экспериментов на действующих МНЛЗ используется в самых необходимых случаях для непосредственного измерения и уточнения основных технологических или теплотехнических параметров, при проведении балансовых испытаний и т.д.

Для решения многих частных вопросов достаточно полную информацию можно получить с помощью экспериментальных исследований в лабораторных условиях. Из практики известны методы экспериментального изучения на специальных лабораторных стендах или на физических моделях особенностей гидродинамики и теплообмена в ЗВО, гидравлических и тепловых характеристик форсунок и других вопросов.

В некоторых случаях используются аналитические методы исследований, на основании которых можно получить подробную информацию об основных закономерностях изучаемых процессов.

В работе В. А. Журавлева и Е. М. Китаева приведено подробное описание известных аналитических методов. Однако при исследованиях непрерывной разливки стали в связи со сложностью физических процессов для большинства аналитических задач применяется упрощенная постановка со многими допущениями. Точное аналитическое решение возможно лишь для некоторых простейших случаев. Трудности аналитического решения, а также существенные допущения и упрощения, снижающие ценность получаемых результатов, ограничивают практическое использование аналитических методов при исследовании непрерывной разливки.

Методы моделирования

Моделирование эффективно при исследовании сложных и труднодоступных процессов и объектов, а также при создании новых агрегатов, когда с помощью принципов подобия появляется возможность прогнозировать изменение основных параметров.

В зависимости от того, каким способом обеспечивается подобие модели и образца, различают три основных вида моделирования: *физическое, аналоговое и математическое*.

В настоящее время *физическoе моделирование* широко применяется для изучения сложных высокотемпературных процессов в металлургии, в том числе и для исследования процесса непрерывной разливки стали. Оно проводится в условиях лаборатории с помощью модельной жидкости, на физических моделях. При этом изучаются закономерности распространения струи жидкого металла, а также проводятся исследования конвективных потоков в жидкой фазе затвердевающего слитка, исследуется теплообмен в кристаллизаторе.

Метод аналогий находит практическое применение для экспериментального исследования в условиях лабораторий различных тепловых процессов, в том числе теплотехнических вопросов работы МНЛЗ.

Известны результаты исследований по тепловой работе МНЛЗ, полученные на основе метода гидротепловой аналогии.

Более широкое применение находят методы электрического моделирования, основанные на принципе электротепловой аналогии. Такие модели строятся по принципу моделирования отдельных математических операций (так называемые структурные модели) или воспроизводят аппроксимационную схему уравнения теплопереноса (сеточные модели).

В сеточных моделях или электроинтеграторах получающиеся решения задачи дискретны в пространстве и времени. Их точность полностью определяется выбранной схемой аппроксимации дифференциального уравнения. В зависимости от используемой схемы конечно-разностного представления могут применяться явные и неявные схемы аппроксима-

ции. Основным преимуществом сеточных моделей является возможность коррекции граничных условий задачи по ходу решения, что необходимо для отражения реальных условий протекания изучаемых процессов. Кроме того, эти модели несложны в изготовлении и просты в эксплуатации.

Примером структурных моделей являются аналоговые вычислительные машины (АВМ), которые наиболее эффективны для решения различных динамических задач. Их основным преимуществом является наглядность получаемого решения. Часто АВМ работают в комплекте с электронным осциллографом, на экране которого наглядно воспроизводятся исследуемые физические процессы.

В последнее время в инженерной практике все большее распространение находит метод математического моделирования.

Математическая модель представляет собой математическое описание физического процесса и предусматривает методы, позволяющие анализировать и исследовать данный процесс. В отличие от физической математической модели представляет собой систему математических символов и внешне не имеет сходства с образцом, характеризуя в какой-то степени абстрактное представление об изучаемых явлениях.

Целесообразность и необходимость использования метода математического моделирования обусловлено трудностями аналитического решения сложных теплофизических задач, в частности, задач затвердевания металла и практической потребностью в осуществлении их более точных решений.

Особенно эффективным и перспективным является применение метода математического моделирования для прогнозирования работы МНЛЗ; с его помощью можно решать практические задачи повышения производительности установок, перехода на другие марки стали и размеры слитков.

Метод математического моделирования открывает широкие возможности для разработки систем автоматического проектирования (САПР).

Большое практическое значение имеет комплексная методика исследования и настройки систем вторичного охлаждения МНЛЗ, описанная в работе Ю. А. Самойловича и др. Существо этой методики состоит в сочетании прогнозов кристаллизации слитка, выполняемых с использованием ЭВМ, и экспериментального метода измерения температур слитка.

Рекомендуется следующая последовательность операций.

1. Прогнозирование рациональных режимов вторичного охлаждения осуществляется на основе математического моделирования с применением ЭВМ. В ходе прогнозирования используется известная информация о закономерностях затвердевания слитков и интенсивности охлаждения для форсунок заданного типа. На основе прогнозирования вырабатываются предварительные рекомендации по расположению секций (и форсунок в секциях) вторичного охлаждения МНЛЗ, которые могут быть использованы при проектировании МНЛЗ.

2. Измерение температур в сечении слитка путем вмораживания блока термопар, выполняемое в промышленных условиях на стадии освоения МНЛЗ, позволяет получить информацию о режиме охлаждения.

3. Восстановление граничных условий (величин теплового потока и коэффициента теплоотдачи) в ЗВО осуществляется на основе экспериментальных данных термического анализа и методики математического моделирования процесса кристаллизации слитка с применением ЭВМ. В результате устанавливается зависимость удельного расхода воды через форсунку g_f от коэффициента теплоотдачи α . Полученная зависимость может быть использована при проектировании МНЛЗ подобного типа.

4. На основе уточненных граничных условий выполняется корректирование в расположении секций ЗВО, числа форсунок в них и распределения расходов охлаждающей воды по периметру слитка и его длине.

По мнению авторов, изложенная комплексная методика может использоваться для МНЛЗ любого типа. Применение комплексной методики представляется актуальным в связи с расширением производства непрерывных слитков, разнообразием агрегатов, формы и сечений слитков. Комплексная методика прошла испытания в промышленных условиях и неоднократно успешно использовалась сотрудниками Липецкого политехнического института при исследованиях и отработке режимов вторичного охлаждения на НЛМК.

Глава 3. ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КРИСТАЛИЗАТОРЕ

§ 1. ПРИНЦИП РАБОТЫ КРИСТАЛИЗАТОРА

Кристаллизатор является важнейшим технологическим узлом МНЛЗ, так как в нем происходит формирование непрерывного слитка.

Основное назначение кристаллизатора – это формообразование слитка и отвод от кристаллизующейся стали такого количества тепла, которое обеспечивает условия для непрерывного формирования твердой оболочки слитка 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 непрерывных слитков из сталей многих марок; необходимую скорость вытягивания слитка; стабильность и надежность процесса не-

прерывной разливки; высокую стойкость, обеспечивающую рентабельную работу всей установки; безопасность работы.

Пример конструкции кристаллизатора представлен на рис. 4. Кристаллизатор представляет собой жесткую конструкцию, состоящую из внутренних рабочих пластин (1) и внешнего корпуса (2). В стенах кристаллизатора имеются каналы (3) для протекания охлаждающей воды.

По принципу работы различают кристаллизаторы стационарные (неподвижные) и подвижные со специальным механизмом качания. Неподвижные кристаллизаторы и на пружинах применялись ранее для малых сечений и низких скоростей. В последнее время для разливки слитков крупных сечений и при сравнительно высоких скоростях разливки применяются кристаллизаторы с возвратно-поступательным движением (качанием), улучшающим скольжение слитка.

Во время разливки кристаллизатору придается возвратно-поступательное движение с шагом 10–50 мм, с частотой качаний ~100 в мин. Режимы качания могут быть синусоидальными, поступательными с движением вниз со скоростью вытягивания слитка, вверх – со скоростью, в 3 раза большей и др.

Возвратно-поступательное движение кристаллизатора способствует увеличению скорости затвердевания, особенно в верхней части.

По мере развития способов и технологии непрерывной разливки кон-

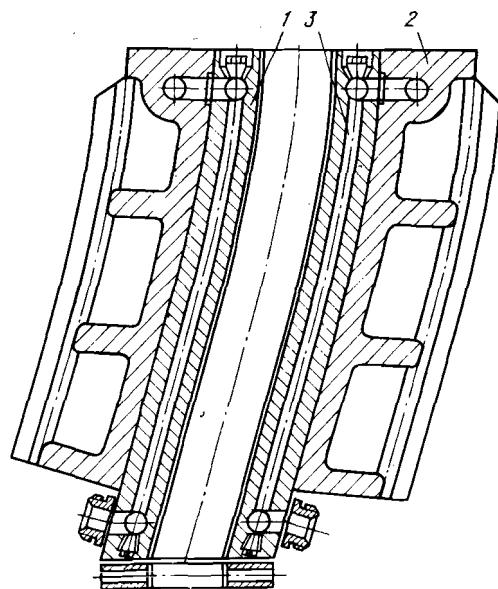


Рис. 4. Кристаллизатор криволинейной МНЛЗ

струкции кристаллизаторов неоднократно изменялись и совершенствовались.

В зависимости от способов изготовления в настоящее время при непрерывной разливке стали применяются сборный, составной кристаллизатор, рабочие стенки которого выполнены из отдельных плит; блочный кристаллизатор, состоящий из монолитного материала, в котором выполнена рабочая полость; гильзовый кристаллизатор, рабочие стенки которого выполнены из цельной медной гильзы; а также другие типы конструкций (например, в наклонных установках конвейерного типа применяют литье между лентами конвейера и т.д.).

Раньше часто использовались сварные конструкции кристаллизаторов, а в настоящее время применяются преимущественно сборные, которые значительно облегчают монтаж и смену деталей.

По опыту эксплуатации и особенностям тепловой работы можно выделить следующие типы кристаллизаторов:

- 1) тонкостенные сборные с прямоугольными каналами для циркуляции воды, частным случаем этого типа являются гильзовы кристаллизаторы;
- 2) толстостенные сборные со сверлеными цилиндрическими каналами;
- 3) блочные толстостенные со сверлеными цилиндрическими каналами;
- 4) гильзовы кристаллизаторы.

Тонкостенные сборные кристаллизаторы первого типа широко применяются у нас в стране и за рубежом. Кристаллизатор собирается из четырех отдельных стенок, каждая из которых состоит из рабочей медной и опорной стальной (или чугунной) плит, соединенных между собой шпильками. Толщина рабочей медной плиты изменяется в пределах 10÷25 мм. Щелевые каналы прямоугольного сечения для прохода охлаждающей воды выполняются или в медных рабочих пластинах или в стальном корпусе (рис. 5a); толщина каналов ~5 мм. Стенки крис-

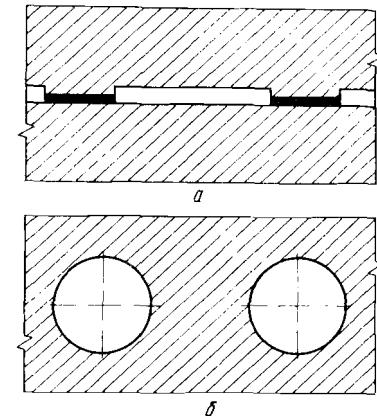


Рис. 5. Схемы каналов в стенках кристаллизаторов:
а – тонкостенный кристаллизатор с прямоугольными каналами; б – толстостенный кристаллизатор со сверлеными цилиндрическими каналами

таллизатора либо собираются в особом корпусе, либо соединяются между собой с помощью специальных стяжек и болтов. Кристаллизаторы этого типа находят широкое применение для сортовых отливок.

Тонкостенные кристаллизаторы обладают высоким теплоотбором от слитка, простотой изготовления и невысоким расходом меди на 1 т разливаемой стали. Медные пластины являются сменными, заменяются после 2–3 прострочек, а остальные детали используются длительное время.

К недостаткам тонкостенных кристаллизаторов можно отнести невысокую стойкость из-за сравнительно быстрого истирания углов, нарушения плотности соплнения стенок в углах, сложность сборки.

Толстостенные сборные кристаллизаторы изготавливают из четырех отдельных стенок или из двух гнутых П-образных половин, жестко соединяемых по узким граням и со стальным корпусом. Толщина медных стенок составляет 50–60 мм, сверленные каналы диаметром 20 мм выполняются вертикально вдоль стен с шагом 45 мм (рис. 5б). Расстояние водоохлаждаемого канала до рабочей поверхности составляет $\sim 15 \div 20$ мм.

Толстостенные кристаллизаторы со сверлеными каналами для охлаждающей воды были разработаны и внедрены с целью снижения неравномерности теплоотвода от корочки в начальный момент затвердевания. Стойкость этих кристаллизаторов в 2–3 раза выше, чем тонкостенных. Исследования показали, что по теплоотбору оба эти типа кристаллизатора равнозначны.

С увеличением скорости разливки возрастает искажение профиля слитка. Однако на опыте установлено, что кристаллизаторы с толстыми медными стенками, жестко скрепленными со стальным корпусом, обеспечивают наименьшую деформацию рабочей полости.

Основным недостатком толстостенных кристаллизаторов является повышенный расход меди, а также истирание углов и нарушение сплошности стыков в углах.

Блочные толстостенные кристаллизаторы иногда применяются для отливки сортовых заготовок. Они изготавливаются из цельного медного блока. Стойкость блочных кристаллизаторов не выше, чем сборных, а основными недостатками являются сложность изготовления и высокий расход меди. Блочные кристаллизаторы не находят широкого применения. Гильзовые кристаллизаторы до размера 200 × 200 мм имеют широкое применение.

Каждый из перечисленных типов кристаллизаторов имеет свою специфику и характерную область применения. Так, для плоских (прямоугольных) заготовок применяются, в основном, сборные кристаллизаторы. Для квадратных заготовок – сборные и цельные (блочные). Для отливки круглых заготовок применяются кристаллизаторы из цельнотянутых труб. В машинах криволинейного типа для отливки крупных слябов применяются, как правило, сборные толстостенные кристаллизаторы.

В зависимости от конструкций МНЛЗ различают прямолинейный (в основном, для вертикальных МНЛЗ) или радиальный (для радиальных и криволинейных машин) кристаллизаторы.

В радиальном кристаллизаторе медные плиты образуют внутреннюю рабочую полость, кривизна которой соответствует радиусу технологической оси МНЛЗ. Сверления для охлаждающей воды выполняются в медных плитах до их изгиба по заданному радиусу. Медные плиты, являющиеся узкими сторонами кристаллизатора, зажаты между листами, которые образуют широкие стороны.

Сортовые заготовки часто разливают в кристаллизаторы с параллельными стенками, иногда делают прямую конусность для уменьшения трения и улучшения качества поверхности. При разливке в крупные заготовки с толщиной ~ 300 мм используют кристаллизаторы с обратной конусностью ($\sim 1\%$). При отливке крупных слитков с целью повышения эффективности работы нижней части кристаллизатора и предохранения от прорывов применяют сборные кристаллизаторы с поджатием узких граней. С этой же целью применяются кристаллизаторы с обратной конусностью.

В последнее время получают распространение кристаллизаторы с раздвижными стенками, где имеются возможности для быстрого изменения сечения кристаллизатора.

В конструкции кристаллизаторов предусматривается возможность изменения конусности. Внутренние размеры кристаллизатора соответствуют заданному сечению слитка. Форма сечения кристаллизатора в зависимости от требуемой заготовки может быть прямоугольной, квадратной, круглой, фасонной. Длина кристаллизатора зависит от сечения разливаемых слитков и в общем случае может изменяться от 300 до 1500 мм. Для заготовок мелких сечений иногда применяются кристаллизаторы длиной до 100 мм, при отливке заготовок крупных сечений у нас применяются кристаллизаторы длиной 1100–1200 мм. На зарубежных установках работают более короткие кристаллизаторы длиной 500–1000 мм.

Возможность применения коротких кристаллизаторов теоретически обосновывается тем, что корка должна затвердевать лишь такой толщины, которая обеспечит достаточную прочность оболочки слитка. Минимально допустимая толщина корочки на выходе из кристаллизатора в зависимости от сечения заготовки составляет $10 \div 25$ мм. Такую толщину корки можно получить при разливке через кристаллизатор длиной менее 1000 мм. Преимуществами таких кристаллизаторов являются простота изготовления и меньший расход меди.

Отечественные исследования и практический опыт эксплуатации современных МНЛЗ показал, что надежная и стабильная работа при удовлетворительном качестве может обеспечиваться с кристаллизатором длиной $800 \div 1000$ мм.

Но при возникновении зазора между слитком и стенкой кристаллизатора и неравномерном по периметру затвердевании слитка создается опасность прорывов.

На практике часто возникают осложнения при снижении уровня металла в кристаллизаторе и др., поэтому при работе с короткими кристаллизаторами необходимо строгое выполнение режима разливки.

Материал рабочих стенок кристаллизатора должен обладать прежде всего высокой теплопроводностью, а с другой стороны иметь достаточно высокие механические свойства для уменьшения износа. В большинстве случаев внутренние рабочие стенки кристаллизатора, непосредственно соприкасающиеся с жидким металлом, изготавливают из красной меди, чистоте которой предъявляют особые требования. Чем чище медь, тем выше ее теплопроводность, но ниже твердость, поэтому медные стенки сравнительно быстро истираются (изнашиваются). Следствием недостаточной твердости меди является также высокий коэффициент трения между корочкой слитка и стенкой кристаллизатора.

Обычно используют горячекатаную раскисленную медь, легированную серебром холоднокатаную или же медь, подвергнутую дисперсному твердению, применяют дисперсионно твердеющие сплавы меди, хромирование, алитирование медных рабочих стенок, напыление на рабочие поверхности кристаллизатора твердосплавных материалов и др. Используют также никелевые сплавы, бронзовые сплавы, а иногда изготавливают рабочие стенки из стали толщиной 3÷7 мм. Но пока эти меры не дают ощутимых результатов.

За рубежом лучшие результаты получали на кристаллизаторах с покрытием из молибдена или чистых молибденовых пластин толщиной 10 мм.

Внешние стенки корпуса кристаллизатора представляют собой жесткую раму. Они изготавливаются из чугуна или стали для придания корпусу необходимой прочности и сохранения профиля. Поверхность рабочих стенок делается гладкой или рифленой.

С увеличением размера широкой грани возрастает абсолютная величина деформации оболочки слитка при усадке металла. Затрудненная усадка широкой грани вызывает появление в оболочке слитка значительных напряжений, которые при наличии местных концентраторов напряжений могут привести к возникновению продольных трещин. Уменьшение напряжений можно достичь путем рассредоточения деформации по многим малым участкам широкой грани, что достигается ее профилированием. Использование кристаллизаторов с профилированными (ребристыми, волнистыми, рифлеными) широкими стенками приводит к сокращению брака непрерывных слитков по продольным трещинам при условии соблюдения определенных соотношений между шагом и высотой применявшихся пилообразных, синусоидальных или параболических выступов профилированных стенок.

§ 2. ТЕПЛООБМЕН В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ

Кристаллизатор выполняет две основные функции: формообразователя и теплообменного аппарата. В нем отводится $\sim 20 \div 25\%$ всего тепла слитка.

Дальнейшее повышение качества непрерывного слитка, повышение стабильности работы МНЛЗ и ее производительности в значительной степени зависит от правильной организации тепловых процессов в начальной стадии затвердевания слитка в зоне кристаллизатора. В кристаллизаторе начинается формирование твердой корочки слитка, поэтому возможность возникновения различных дефектов и допустимая скорость разливки во многом зависят от условий кристаллизации и процессов теплообмена между жидким металлом и стенками кристаллизатора.

Исследование тепловых режимов работы кристаллизатора позволяет выявить основные закономерности теплообмена. Актуальной задачей является дальнейшее совершенствование процессов охлаждения заготовки в зоне кристаллизатора, направленных на интенсификацию кристаллизации, а следовательно, и на повышение производительности МНЛЗ. Кристаллизатор должен обеспечивать основные требования — высокий теплоотвод и условия непрерывного формирования твердой оболочки слитка. Тепловой режим кристаллизатора организуется так, чтобы на выходе твердая оболочка слитка была достаточной по толщине и прочности для предотвращения возможности прорыва металла. Распределение интенсивности теплоотвода по периметру и длине слитка должно обеспечивать отсутствие опасных напряжений, которые могли бы привести к появлению трещин. Толщина оболочки слитка ξ на выходе из кристаллизатора зависит от скорости разливки, физических свойств стали и размеров слитка. При повышении скорости разливки толщина корочки слитка на выходе из кристаллизатора уменьшается, а тепловой поток при этом возрастает. Имеется эмпирическая зависимость для оценки толщины корочки: $\xi = Q / (11,5 v P)$, где Q — тепловой поток, Вт; v — скорость разливки, м/мин; P — периметр заготовки, м; 11,5 — опытный коэффициент.

На базе аналитического решения классической задачи Стефана при постоянной температуре поверхности было получено уравнение квадратного корня, которое связывает толщину корочки ξ со временем t , т.е. $\xi = k\sqrt{t}$, где k — коэффициент затвердевания, величина которого для разных сталей может изменяться в пределах $2,3 \div 3,2$ см/мин 0,5 . Эта зависимость может использоваться для примерных расчетов при условии, что температура поверхности слитка в пределах кристаллизатора изменяется незначительно.

При подводе жидкой стали в кристаллизатор рекомендуется поддерживать величину перегрева на уровне 30°C . Практически температура жидкой стали на входе в кристаллизатор изменяется в пределах $1520 \div$

$\div 1550^{\circ}\text{C}$. При плотном контакте в верхней части кристаллизатора температура поверхности корочки падает до $600 \div 900^{\circ}\text{C}$, а затем после образования зазора повышается и на выходе из кристаллизатора составляет величину $1100 \div 1200^{\circ}\text{C}$. Средняя температура корочки слитка в кристаллизаторе составляет $\sim 1300 \div 1350^{\circ}\text{C}$. С увеличением скорости разливки температура поверхности слитка на выходе из кристаллизатора возрастает.

Максимальная температура медных стенок кристаллизатора на стороны жидкого металла может достигать $200 \div 240^{\circ}\text{C}$.

В кристаллизаторе происходит процесс передачи тепла от жидкого металла к охлаждающей воде, протекающей в каналах рабочих стенок кристаллизатора.

Величина теплового потока определяется по основному уравнению теплопередачи:

$$Q = K(t_{\text{ж}} - t_{\text{в}})F,$$

где K – коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; F – площадь поверхности теплообмена, м^2 ; $t_{\text{ж}}$ и $t_{\text{в}}$ – температуры жидкого металла и охлаждающей воды соответственно, $^{\circ}\text{C}$.

Интенсивность теплопередачи в кристаллизаторе обычно характеризуют величиной средней плотности теплового потока $\text{Вт}/\text{м}^2$, т.е.

$$q = K(t_{\text{ж}} - t_{\text{в}}).$$

При постоянной скорости вытягивания непрерывного слитка и неизменности других технологических параметров разливки во времени передачу тепла от жидкого металла к охлаждающей воде можно рассматривать как теплопередачу при стационарном режиме. Весь сложный процесс теплопередачи можно разделить на несколько этапов: передача тепла

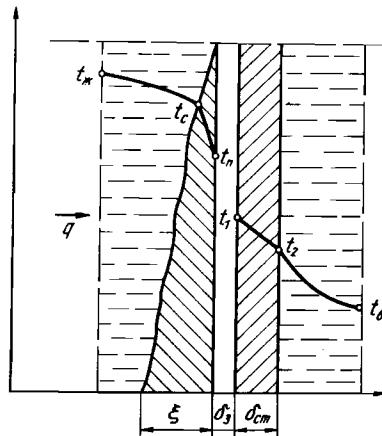


Рис. 6. Схема теплопередачи в кристаллизаторе

от жидкого металла к поверхности образовавшейся твердой корочки, через корочку слитка, от поверхности слитка к стенке кристаллизатора, через медную стенку кристаллизатора и от стенки кристаллизатора к охлаждающей воде. На рис. 6 показана схема процесса теплопередачи в кристаллизаторе.

Тогда можно составить следующую систему уравнений, каждое из которых определяет плотность теплового потока на соответствующем этапе теплопередачи:

$$\begin{cases} q = \alpha_{\text{ж}}(t_{\text{ж}} - t_{\text{c}}); \\ q = (\lambda_{\text{м}}/\xi)(t_{\text{c}} - t_{\text{n}}); \\ q = (t_{\text{n}} - t_1)/R_{\text{K}}; \\ q = (\lambda_{\text{ct}}/\delta_{\text{ct}})(t_1 - t_2); \\ q = \alpha_{\text{в}}(t_2 - t_{\text{в}}), \end{cases} \quad (1)$$

где $\alpha_{\text{ж}}$ – коэффициент теплоотдачи от жидкого металла к твердой корочке, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; t_{c} – температура солидуса для данной марки стали, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{ж}}$ – температура жидкой стали, $^{\circ}\text{C}$; $\lambda_{\text{м}}$ – коэффициент теплопроводности металла, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; ξ – толщина образовавшейся корочки металла, м ; t_{n} – температура поверхности слитка, $^{\circ}\text{C}$; t_1 – температура наружной стенки кристаллизатора, $^{\circ}\text{C}$; R_{K} – термическое сопротивление области контакта поверхности слитка с рабочей стенкой кристаллизатора, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$; λ_{ct} – коэффициент теплопроводности стенки кристаллизатора, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; δ_{ct} – толщина стенки кристаллизатора, м ; t_2 – температура внутренней стенки кристаллизатора, $^{\circ}\text{C}$; $\alpha_{\text{в}}$ – коэффициент теплоотдачи от воды к стенке кристаллизатора, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $t_{\text{в}}$ – температура охлаждающей воды, $^{\circ}\text{C}$. В соответствии с приведенной схемой теплообмена можно в общем случае записать формулу для коэффициента теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$:

$$K = \frac{1}{(1/\alpha_{\text{ж}}) + (\xi/\lambda_{\text{м}}) + R_{\text{K}} + (\delta_{\text{ct}}/\lambda_{\text{ct}}) + (1/\alpha_{\text{в}})}$$

На основании экспериментальных и расчетных исследований многих авторов выявлены особенности теплообмена между слитком и стенками кристаллизатора. В верхней части кристаллизатора, где жидкая сталь непосредственно соприкасается с его стенкой, происходит интенсивный теплоотвод и образуется тонкая корочка. За этой стадией следует усадка затвердевающей стали, обусловливающая отход стальной корочки от стенки кристаллизатора.

Вверху, в районе мениска металла, плотность теплового потока достигает максимального значения. Затем вследствие усадки затвердевшей

корочки между поверхностью слитка и стенкой кристаллизатора образуется зазор, заполняемый газами. Термическое сопротивление увеличивается, а плотность теплового потока снижается, скорость затвердевания также падает. При этом происходит разогрев корки, прочность ее уменьшается, и под действием ферростатического давления она вновь прижимается к стенке кристаллизатора. Таким образом, происходит многократная пульсация. Окончательное отслоение корки по широким граням происходит на расстоянии 600–800 мм от верха кристаллизатора, при этом плотность теплового потока резко снижается. По узким граням зона непосредственного контакта составляет 150–200 мм, а затем происходит образование зазора и резкое снижение плотности теплового потока.

Установлено, что плотного контакта между корочкой слитка и стенками кристаллизатора не существует даже в первые моменты кристаллизации. Корка формирующегося слитка соприкасается со стенками по всей поверхности в отдельных точках, между которыми имеется газовый зазор, образуемый между складками на поверхности слитка, которыми он опирается на стенку кристаллизатора. Проводимые опыты подтверждают, что зазор между слитком и стенкой кристаллизатора не стабилен и по всей высоте кристаллизатора имеется периодический контакт. По мере удаления от мениска металла уменьшается относительное время контакта оболочки слитка со стенками кристаллизатора, что обусловлено усадкой слитка, увеличением толщины корочки и ее жесткости. Однако даже на выходе из кристаллизатора контакт полностью не прерывается, что свидетельствует об отсутствии в кристаллизаторах зоны полного отделения слитка от медных стенок.

Толщина газового зазора нестабильна и может меняться по высоте и периметру кристаллизатора, поэтому правильно считать, что в верхней части кристаллизатора наиболее частое соприкосновение, и теплоотвод более интенсивен, а в нижней части корочка слитка значительно отходит от стенок кристаллизатора, и величина теплоотвода существенно снижается. Некоторые авторы предлагают называть верхнюю часть кристаллизатора зоной повышенного теплоотъема, а остальную часть зоной нормального теплоотъема и вводят понятие о средней эффективной величине газового зазора.

Суммарное термическое сопротивление передачи тепла в кристаллизаторе от жидкого металла к охлаждающей воде складывается из термических сопротивлений отдельных участков: 1) от жидкого металла к затвердевающей корочке слитка; 2) через затвердевшую корочку металла; 3) от поверхности слитка к стенке кристаллизатора через газовый зазор; 4) через медную стенку кристаллизатора; 5) от стенки кристаллизатора к охлаждающей воде.

В советской и зарубежной литературе отмечается, что первое, четвертое и пятое сопротивления относительно малы и практически постоянны

в процессе разливки, их величина в сумме составляет 4–6 % от общего термического сопротивления. Второе и третье сопротивления представляют собой значительные величины, изменяющиеся при разливке.

Ниже приведены экспериментальные данные термических сопротивлений (%) на отдельных участках:

Газовый зазор	71/(60÷65)
Корка слитка.	26/(23÷31)
Медная стенка кристаллизатора	1/-
От стенки кристаллизатора к воде.	2/(4÷6)
Итого	100/100

Приложение. В числителе данные для вертикальных МНЛЗ, в знаменателе – для криволинейных.

Как видно из приведенных данных, основную долю в общем термическом сопротивлении составляет сопротивление газового зазора. Определение термического сопротивления контакта R_k при наличии газового зазора представляет значительные трудности и требует детальной и полной информации об условиях контакта слиток – кристаллизатор.

При строгом расчете теплопередачи необходимо учитывать роль гидродинамики жидкого расплава. Однако в настоящее время влияние движения жидкого металла на теплопередачу в кристаллизаторах изучено еще недостаточно.

Гидродинамические факторы обусловлены воздействием вынужденных и естественных потоков жидкого металла внутри слитка. Вынужденное движение жидкой стали возникает при воздействии струи металла, поступающего в кристаллизатор. Естественная конвекция вызывается разностью плотностей металла у фронта затвердевания и в центре заготовки вследствие его различной температуры. Струя жидкого металла при поступлении в кристаллизатор вызывает значительную неравномерность толщины корки слитка, а иногда является причиной образования поверхностных продольных трещин, особенно при отливке широких слябов. Это приводит к неравномерности тепловых потоков, что в свою очередь, способствует дальнейшему развитию неравномерности процесса кристаллизации.

Вынужденное движение жидкого металла под действием струи прекращается на некотором расстоянии от мениска, после чего решающее значение приобретает естественная конвекция в жидкой сердцевине заготовки. Переход на разливку под уровень горизонтальными или наклонными струями существенно изменил характер циркуляционных потоков в кристаллизаторе, уменьшив динамическое воздействие струи и, следовательно, уменьшил влияние вынужденной конвекции.

Примерные значения коэффициентов теплоотдачи от жидкой стали к затвердевшей корочке можно подсчитать по известной критериальной зависимости для турбулентного движения жидкости:

$$Nu = 0,024 Re^{0,8} Pr^{0,35},$$

где Nu , Re , Pr – критерии подобия Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля.

В качестве определяющего размера принимается длина участка стеки, на которой практически сохраняют свою величину максимальные потоки жидкости, $l_{ж} = 0,12$ м. Отсюда для расчета коэффициента теплоотдачи В. Т. Сладкоштеевым получена следующая формула:

$$\alpha_{ж} = 41519 w^{0,8},$$

где w – скорость потоков жидкой стали, м/с.

Расчетные значения коэффициентов теплоотдачи при скоростях потоков, омывающих стеки кристаллизатора, порядка $0,1 \div 0,5$ м/с, изменяются в пределах $\alpha_{ж} = 6 \div 20$ кВт/(м² · К). При такой высокой интенсивности теплоотдачи в случае перегрева стали на $20 \div 30^{\circ}\text{C}$ может произойти подплавление корочки, так как тепловые потоки от жидкой стали к корочке могут превысить тепловые потоки от жидкой стали к воде.

А. Д. Акименко определил коэффициент теплоотдачи от жидкого металла к внутренней поверхности корки по критериальной зависимости для свободной конвекции: $Nu = 0,106 Gr^{0,33} Pr^{0,4}$, где Gr – критерий Грасгофа; $Nu = (\alpha_{ж} l) / \lambda$. Получено расчетное значение $\alpha_{ж} = 8,3$ кВт/(м² · К).

В книге А. А. Скворцова и А. Д. Акименко приведены результаты моделирования разливки стали в кристаллизатор. Получены средние значения конвективных скоростей у стенок кристаллизатора в пределах $0,01 \div 0,015$ м/с. При таких скоростях и соответственно небольших величинах чисел Рейнольдса действительны закономерности ламинарного пограничного слоя. Коэффициент теплоотдачи в этом случае можно рассчитать по критериальной зависимости С. С. Кутателадзе для теплоотдачи от жидких металлов: $Nu = 1,1 [(1 - Pr^{1/3}) Re^{1/2}]$, где Re – критерий Пекле.

При этом расчетные значения коэффициента теплоотдачи от жидкой стали к стенке кристаллизатора [$2670 \div 3150$ Вт/(м² · К)] более близки к фактическим значениям, полученным в опытах.

Примерно такие же расчетные значения $\alpha_{ж}$ получены в работах некоторых зарубежных авторов при использовании критериальной зависимости для ламинарного пограничного слоя.

Более низкие экспериментальные значения $\alpha_{ж}$ обусловлены, очевидно, дополнительными термическими сопротивлениями слоя смазки и оксидов на стеках кристаллизатора, которые в расчетах не учитывались. Так как коэффициент $\alpha_{ж}$ заметно влияет на отвод тепла лишь на небольшом начальном участке движения слитка в пределах $0,06 \div 0,15$ м и теоретически невозможно точно рассчитать действительное термическое сопротивление, рекомендуется при расчетах коэффициента теплоотдачи K использовать примерную величину коэффициента теплоотда-

чи $\alpha_{ж} = 2100$ Вт/(м² · К), многократно подтвержденную экспериментально.

Величина термического сопротивления $1/\alpha_{ж}$ сравнительно мала, поэтому в расчетах ею иногда пренебрегают. Расчет теплопередачи без учета влияния конвективных потоков в жидкой стали приводит к небольшой ошибке при определении температур, главным образом, в верхней части слитка. Практически это не влияет на величину теплосодержания всего слитка, так как его изменение зависит, в основном, от отвода тепла с внешней поверхности затвердевшей корочки. Уточнение расчета температурного поля слитка обеспечивается введением эквивалентного коэффициента теплопроводности λ_0 , который учитывает влияние конвективных потоков стали на ускоренный теплоотвод от слитка. Величина плотности теплового потока q зависит от коэффициента теплоотдачи $\alpha_{ж}$ от жидкой стали к оболочке. Однако при изменении коэффициента теплоотдачи вдвое величина плотности теплового потока изменяется всего лишь на 8 – 9 %.

В. Т. Сладкоштеевым получено хорошее совпадение расчетных данных значений плотности теплового потока с экспериментальными при изменении расчетных значений коэффициента теплоотдачи $\alpha_{ж}$ в пределах от 1,163 до 5,82 кВт/(м² · К).

При исследовании тепловых процессов в кристаллизаторе без учета потерь можно считать, что тепловой поток, отнимаемый от слитка, равен тепловому потоку, отведенному с охлаждающей водой, который можно определить экспериментально с помощью формулы:

$$Q = G_B C_B (t''_B - t'_B),$$

где G_B – расход охлаждающей воды, кг/с; C_B – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг · К); t'_B и t''_B – соответственно начальная и конечная температура охлаждающей воды, °С.

Расход воды определяют из условия, когда ее нагрев не превышал величину $10 \div 20^{\circ}\text{C}$, а конечная температура воды на выходе из кристаллизатора была $< 40 \div 45^{\circ}\text{C}$ по условиям накипеобразования. Водяное охлаждение должно обеспечивать необходимый теплоотвод и стойкость работы кристаллизатора. Из этих условий определяются оптимальные скорости воды. Как показывают эксперименты, при $w_B = 5$ м/с и более интенсивность теплоотвода стабилизируется, поэтому на практике скорость движения воды в каналах изменяется в пределах $3 \div 5$ м/с. При разливке крупных слитков расход воды на кристаллизатор составляет до 500 м³/ч.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией α_B при скоростях охлаждающей воды ≥ 4 м/с можно точно рассчитать по критериальной зависимости для вынужденного турбулентного движения. Для скорости воды 5 м/с численное значение коэффициента теплоотдачи составляет $\sim 20X$

$\times 10^3$ Вт/(м² · К). При таких высоких значениях α_b величина термического сопротивления $1/\alpha_b$ очень мала.

Расчетная оценка термического сопротивления медной стенки кристаллизатора показала, что при сравнительно небольшой толщине стенки и высокой теплопроводности меди его величина получается пренебрежительно малой. В связи с этим для упрощения расчетов можно с достаточной точностью учитывать лишь термические сопротивления корочки металла и контакта при определении плотности теплового потока:

$$q = \frac{t_c - t_1}{(\xi/\lambda_M) + R_K}.$$

Термическое сопротивление от поверхности слитка к стенке кристаллизатора (R_K) определяется условиями контакта между этими поверхностями и наличием так называемого эффективного (или "кажущегося") зазора.

На основании многих исследований советских и зарубежных авторов установлено, что в нижней части кристаллизатора при наличии зазора между поверхностью затвердевшей корочки и стенкой кристаллизатора перенос тепла в нем осуществляется теплопроводностью и излучением.

На величину теплового потока через зазор наибольшее влияние оказывает теплопроводность (75 %), а доля излучения составляет ~25 %.

Величину плотности теплового потока можно выразить уравнением:

$$q = (\lambda_3/\delta_3) (T_p - T_1) + \epsilon_{pr} C_0 [(T_p/100)^4 - (T_1/100)^4],$$

где λ_3 – коэффициент теплопроводности газов в зазоре, Вт/(м · К); δ_3 – толщина газового зазора, м; T_p – температура поверхности слитка, К; T_1 – температура наружной поверхности стенки кристаллизатора, К; ϵ_{pr} – приведенный коэффициент степени черноты.

Отсюда можно выразить условную величину коэффициента теплоотдачи излучением:

$$\alpha_p = \frac{\epsilon_{pr} C_0 [(T_p/100)^4 - (T_1/100)^4]}{T_p - T_1}.$$

Тогда термическое сопротивление контакта, равное термическому сопротивлению зазора ($R_K = R_3$), выразится как

$$R_3 = (\delta_3/\lambda_3) + (1/\alpha_p).$$

Для практических расчетов принимают, что толщина зазора δ_3 на расстоянии 0,28 м от низа кристаллизатора изменяется в пределах 0,5–2,5 мм. Коэффициент теплопроводности газов в зазоре существенно зависит от содержания водорода в газовой смеси, поскольку он имеет

почти в 8 раз большую теплопроводность, чем другие составляющие газового слоя (CO₂, N₂ и т. д.). Его численная величина $\lambda_3 = 0,093$ Вт/(м · К) при среднем содержании водорода 12 %.

Приведенный коэффициент $\epsilon_{pr} = 0,6 \div 0,7$. При температуре поверхности слитка 1200°C получается расчетная величина коэффициента теплоотдачи излучением 170–180 Вт/(м² · К).

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

Опытами установлено, что коэффициент теплопередачи K в верхней части кристаллизатора изменяется в пределах 1250–1450 Вт/(м² · К), а в нижней части при наличии зазора $K = 250 \div 450$ Вт/(м² · К).

Распределение величины плотности теплового потока по длине кристаллизатора или в функции времени характеризуется плавной кривой, близкой к экспоненте. Плотность теплового потока в верхней части достигает величины 2,0–2,5 мВт/м², а в нижней части кристаллизатора снижается до 0,3–0,7 мВт/м². Среднее значение плотности теплового потока составляет 0,8–0,9 мВт/м².

Как показали исследования радиальных кристаллизаторов, интенсивность теплоотвода по широким граням одна и та же, а величины тепловых потоков одинаковы по широким граням большого и малого радиусов только в районе мениска жидкого металла. В нижней части кристаллизатора теплоотвод в широких стенках большого радиуса, как правило, выше теплоотвода в стенках малого радиуса, а средний теплоотвод в стенках большого радиуса выше на 10 %.

Плотность теплового потока в верхней зоне радиальных кристаллизаторов составляет 1,15–1,25 мВт/м², в нижней зоне 0,4–0,5 мВт/м², т. е. близка к показателям в вертикальных кристаллизаторах для сравнимых высот, сечений слитков и скоростей разливки.

Зависимость теплоотвода от скорости разливки аналогична для радиальных и прямолинейных кристаллизаторов.

Результаты экспериментов и расчетов позволяют заключить, что нижняя часть кристаллизатора слабо используется с тепловой точки зрения.

Образование достаточно твердой корочки и газового зазора происходит стабильно уже на 1/3 высоты кристаллизатора. Однако в нижней зоне кристаллизатора отбирается большая часть тепла (до 70–80 %). Образование зазора приводит к уменьшению теплоотвода в 5–8 раз, увеличению температуры корки на 150–200°C.

Для устранения вредного влияния газового зазора применяют кристаллизаторы с обратной конусностью и регулируемым теплоотводом в нижней части кристаллизатора за счет подвижных прижимных стенок.

Эти меры позволяют обеспечить более равномерное охлаждение слитка по высоте, при этом уменьшается величина газового зазора, значительно увеличивается теплоотвод в кристаллизаторе и толщина корочки на выходе.

Одним из способов управления интенсивностью теплообмена в кристаллизаторе является применение непосредственного охлаждения поверхности слитка в пределах кристаллизатора водой или водо-воздушной смесью. В этом случае предусматривается комбинированное охлаждение: в верхней части кристаллизатора обычное контактно-экранное, а в нижней – вынужденное конвективное за счет подачи охладителя на поверхность слитка.

В литературе имеются данные о применении в кристаллизаторах испарительного охлаждения, показаны его преимущества с точки зрения интенсификации теплопередачи и сокращения расходов охлаждающей воды.

Однако пока испарительное охлаждение не находит широкого промышленного применения в кристаллизаторах МНЛЗ, очевидно, из-за повышения температуры стенки кристаллизатора и более тяжелых условий ее работы.

§ 3. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ

Исследования тепловой работы кристаллизаторов проводились многими авторами; анализировалась зависимость теплообмена от различных факторов.

Д. П. Евтеевым определены основные факторы, влияющие на теплообмен между слитками и кристаллизатором, которые разделены на три группы:

- 1) постоянно действующие технологические (марка стали, температура металла, скорость разливки);
- 2) конструктивные и режимные (размеры граней, длина, конусность, материал и толщина стенок, режим охлаждения);
- 3) непостоянно действующие факторы (деформация оболочки слитка, несимметричное его положение и др.).

Известны различные методы проведения теплотехнических исследований путем изучения кинетики затвердевания оболочки слитка, калориметрированием, с помощью температурных измерений термопарами в стенках кристаллизатора и др.

При проектировании и эксплуатации кристаллизаторов необходимо знать, как влияют отдельные режимные и конструктивные параметры на процесс теплопередачи.

Многие авторы отмечают влияние химического состава стали на теплоотвод в кристаллизаторе, которое возрастает с увеличением скорости. Различие в теплоотводе при разливке разных сталей связывают с усадочными процессами при охлаждении оболочки слитка, приводящими к разным условиям контакта между слитком и стенкой кристаллизатора.

Температура металла, подаваемого в кристаллизатор, изменяется в узких пределах и практически не оказывает влияния на теплоотвод. Увеличение конусности в общем случае приводит к росту теплоотвода в

кристаллизаторе. Однако возможность ее увеличения ограничена, так как при превышении некоторого предела значительно увеличивается трение между слитком и стенками кристаллизатора и повышается склонность слитка к образованию поперечных трещин. Рост теплоотвода наблюдается при профилировании рабочих стенок кристаллизатора.

Скорость вытягивания слитка как величина, пропорциональная времени, является одним из основных факторов, влияющих на теплопередачу в кристаллизаторе. При повышении скорости разливки теплоотвод увеличивается.

Толщина медных стенок незначительно влияет на теплопередачу. При использовании стальных стенок вместо медных возможно снижение теплоотвода примерно на 10 %.

Результаты многих опытов показали, что при увеличении скорости охлаждающей воды свыше 5 м/с величина коэффициента теплопередачи увеличивается незначительно.

Увеличение температуры охлаждающей воды с 20 до 60°C повышает общий коэффициент теплопередачи примерно на 2 %, однако за счет уменьшения перепада температур теплоотъем несколько уменьшается.

По данным А. А. Скворцова и А. Д. Акименко при постоянных скорости вытягивания и длине кристаллизатора остальные факторы меняют коэффициент теплопередачи в пределах до 10 %.

До настоящего времени в литературе имеется мало данных по исследованиям радиальных кристаллизаторов, распределению теплоотвода по периметру слитка и влиянию основных технологических параметров на это распределение. Отсутствуют сведения по условиям охлаждения слитка в динамическом режиме работы МНЛЗ.

Сотрудниками Липецкого политехнического института проводились несколько серий испытаний различных кристаллизаторов на НЛМК. Исследовалась тепловая работа прямолинейных и радиальных кристаллизаторов, коротких и длинных, с гладкой и рифленой внутренней поверхностью, бронзовыми стенками и др. Анализировалось распределение теплоотвода по периметру поперечного сечения кристаллизатора. Впервые исследованы особенности теплоотвода в кристаллизаторе для динамического режима работы МНЛЗ (при изменении скорости).

На вертикальных установках НЛМК проводилось посекционное калориметрирование прямолинейного кристаллизатора длиной 1,2 м, сборного толстостенного с медными рабочими стенками, в которых просверлены каналы диаметром 20 мм с шагом 40 мм для охлаждающей воды.

Методика посекционного калориметрирования заключалась в разделении стенок кристаллизатора на секции определенной ширины по периметру. Измеряя расходы воды и перепады температур на входе и выходе каждой секции, определяли тепловые потоки от слитка к кристаллизатору в пределах каждой секции. Для этого широкие грани кристал-

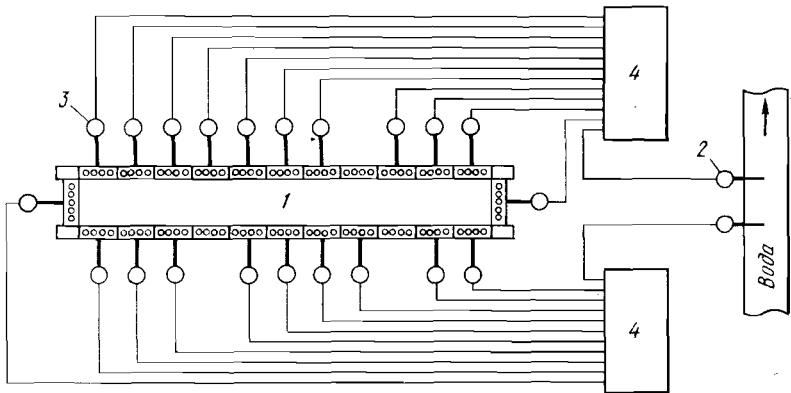


Рис. 7. Схема посекционного калориметрирования кристаллизатора:
1 – кристаллизатор; 2 – измерение температуры воды на входе; 3 – измерение температур на выходе из секций; 4 – вторичные приборы

лизатора разбивали на секции шириной 0,16 м таким образом, чтобы каждая секция включала в себя четыре вертикальных канала и один отводящий патрубок для слива охлаждающей воды. Узкие грани рассматривались как отдельные секции шириной 0,246 м с пятью вертикальными каналами. Измерение температуры охлаждающей воды на выходе из секций проводили непрерывно в течение части кампании кристаллизатора с помощью термометров сопротивления, соединенных с электронным автоматическим мостом с пределами измерений 0–50°C. Температура воды на входе в кристаллизатор измерялась с помощью двух датчиков, установленных в подводящем коллекторе. Схема измерений показана на рис. 7.

Одновременно с измерением температуры проводили записи скорости вытягивания слитка с помощью электронного потенциометра, подключенного к тахогенератору привода тянувшей клети.

Плотность теплового потока для каждой секции определяли по формуле:

$$q = (C\rho G_{\text{в}} \Delta T)/F, \quad (2)$$

где C – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг · К); ρ – плотность воды, кг/м³; $G_{\text{в}}$ – расход воды на секцию, м³/с; ΔT – перепад температур охлаждающей воды, К; F – поверхность теплообмена, м².

При изучении влияния какого-либо параметра на теплоотвод в кристаллизаторе значения остальных параметров поддерживали постоянными.

Исследовали кристаллизаторы с гладкими и профилированными широкими гранями; конусность узких граней составляла 1,0–1,25 %, размеры отливаемых слитков – 0,24 × (1,55–1,71) м²; расход охлаждающей воды в кристаллизаторе 420–450 м³/ч.

На рис. 8, из которого следует, что теплоотвод по периметру кристаллизатора неравномерный, приведены средние значения плотности теплового потока в секциях (при скорости разливки 0,4 м/мин).

Минимальный теплоотвод в обоих типах кристаллизаторов наблюдается через узкие грани и на участках широких граней, прилежащих к углам. На участках вблизи центра широкой грани кристаллизатора с профилированными широкими гранями отмечаются локальные минимумы плотности теплового потока. По результатам испытаний установлено, что теплоотвод через узкие грани кристаллизатора с гладкими рабочими стенками для скоростей вытягивания 0,4–0,5 м/мин в среднем на 18 % меньше, чем через широкие. Эта же величина для профилированного кристаллизатора составляет 29 %. Средний теплоотвод в профилированном кристаллизаторе на 15 % выше, чем в гладкостенном.

При скачкообразном резком изменении скорости разливки теплоотвод в кристаллизаторе принимает значение, соответствующее новой ско-

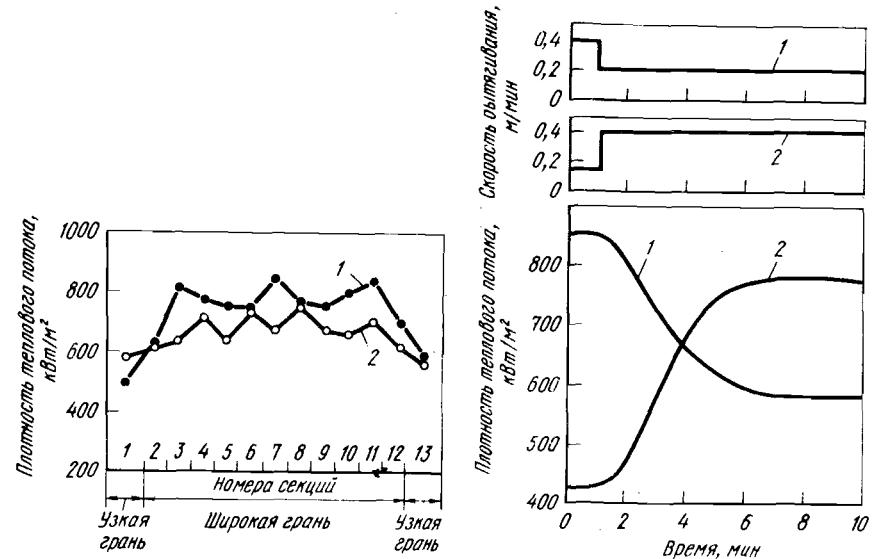


Рис. 8. Распределение плотности теплового потока по граням кристаллизатора при профилированных (1) и гладких (2) стенах

Рис. 9. Переходные процессы в кристаллизаторе при уменьшении (1) или увеличении (2) скорости

ности, через некоторое время, характеризующее протекание в нем переходного процесса. Анализ изменений тепловых потоков показал, что для всех калориметрируемых секций кристаллизатора характер протекания переходных процессов одинаковый (рис. 9).

Зависимость плотности теплового потока от скорости разливки была аппроксимирована В.И. Дождиковым в виде: $q = A\nu^n$ (3), где ν — скорость разливки; A , n — постоянные коэффициенты, определяемые из опыта; для вертикальных МНЛЗ $n = 0,5$.

Ниже приведены значения коэффициента A [$(\text{кВт} \cdot \text{мин}^{1/2}) \text{м}^{5/2}$] для гладкостенного и профилированного кристаллизаторов вертикальной МНЛЗ:

	Весь кристаллизатор	Широкая грань	Узкая грань
Тип кристаллизатора:			
гладкостенный . . .	1020	1060	900
профилированный . .	1190	1230	860

Если рассматривать теплоотвод в кристаллизаторе как функцию расстояния от мениска, то можно отметить ряд закономерностей для широкого диапазона скоростей вытягивания.

Вблизи уровня металла в кристаллизаторе наблюдается абсолютный максимум теплоотвода, что подтверждается результатами зарубежных исследований. А на расстоянии $0,35 \div 0,55$ м от мениска для коротких кристаллизаторов длиной менее 0,7 м имеется абсолютный минимум.

Для кристаллизаторов с большой длиной на этом участке имеется локальный минимум. А на расстоянии $0,6 \div 1,0$ м от мениска в длинных кристаллизаторах существует локальный максимум теплоотвода.

Такой характер распределения плотности теплового потока по длине кристаллизатора объясняется, по-видимому, конкурирующим действием сил усадки затвердевшей оболочки металла, стремящейся уменьшить степень контакта между слитком и стенкой кристаллизатора, и сил ферростатического давления, увеличивающих этот контакт.

Опыты показали, что с увеличением числа разлитых плавок через но-

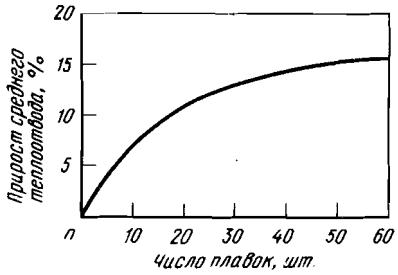


Рис. 10. Изменение среднего теплоотвода в кристаллизаторе

вый кристаллизатор средний теплоотвод через его стенки возрастает. Это происходит, очевидно, за счет приработки стенок в результате их частичного истирания и улучшения условий контакта стенки кристаллизатора и поверхности слитка.

На рис. 10 показана зависимость прироста среднего теплоотвода от числа плавок. Через 50 плавок от начала эксплуатации теплоотвод в кристаллизаторе увеличивается примерно на 15 %. Наибольший прирост теплоотвода наблюдается при разливке первых плавок, а далее замедляется.

На криволинейных машинах НЛМК исследовалась тепловая работа радиального кристаллизатора конструкции УЗТМ длиной 1200 мм. Кристаллизатор сборный толстостенный, в медных рабочих стенках толщиной $65 \div 80$ мм просверлены отверстия диаметром 20 мм, которые соединяются между собой сверху и снизу поперечными каналами диаметром 35 мм. Верхние поперечные каналы широких граней разделены на 3 автономных участка, что обеспечивает петлеобразную схему охлаждения кристаллизатора, показанную на рис. 11.

Проводилось калориметрирование кристаллизатора при разливке слябов сечением $0,25 \times 1,55$ м² в течение кампании 115 плавок в диапазоне скоростей $0,1 \div 1,0$ м/мин. Плотность теплового потока определялась по формуле (2). Перепад температуры охлаждающей воды рассчитывался по формуле: $\Delta t = (\Delta t_R + \Delta t_r)/2$, где Δt_R , Δt_r — соответственно перепады температур по граням большого (R) и малого (r) радиусов.

Результаты экспериментальных исследований позволили получить

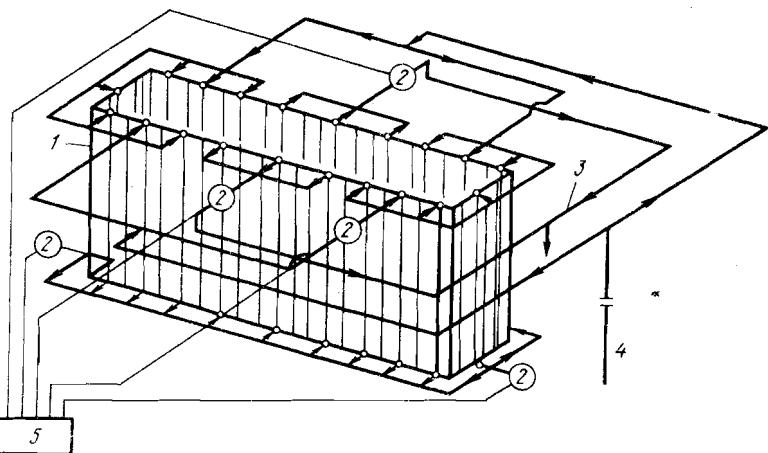


Рис. 11. Петлеобразная схема охлаждения кристаллизатора:
1 — кристаллизатор; 2 — датчики; 3 — отводящий контур; 4 — подводящий контур; 5 — вторичный прибор

зависимость плотности теплового потока от скорости разливки в следующем виде: $q = 0,7635v + 0,3396$.

Получено удовлетворительное совпадение с результатами других работ при исследованиях вертикального и радиального кристаллизаторов длиной 1,2 м, отличие не превышает 5–7 %. Таким образом, использование "петлеобразной" схемы охлаждения не оказывает существенного влияния на тепловую работу радиального кристаллизатора по сравнению с другими.

На основе экспериментальных данных анализировался характер изменения теплового потока при резких изменениях скорости разливки.

На рис. 12 показана зависимость среднего теплового потока от времени при уменьшении скорости разливки. При резком изменении скорости разливки от 0,5 до 0,15 м/мин происходит плавное снижение теплового потока с 3,2 до 1,75 МВт в течение 6 мин, а при дальнейшем понижении скорости с 0,15 до 0,06 м/мин тепловой поток уменьшается с 1,75 до 1,25 МВт в течение 10 мин.

На рис. 13 приведена аналогичная зависимость при понижении ско-

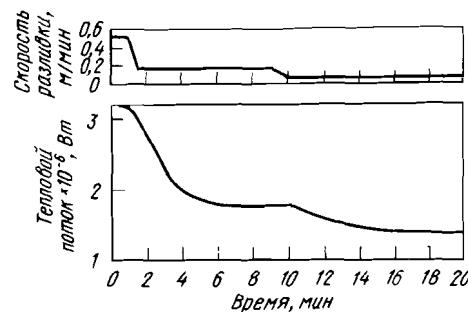


Рис. 12. Переходные процессы в кристаллизаторе

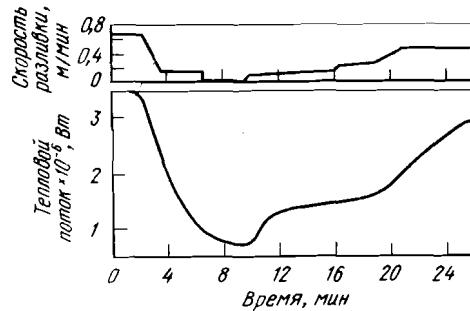


Рис. 13. Переходные процессы в кристаллизаторе

рости разливки с 0,7 до 0,0 м/мин и последующем ее увеличении до 0,5 м/мин.

Эти результаты позволяют оценить динамические характеристики кристаллизатора при переходных режимах работы криволинейной МНЛЗ.

На рис. 14 приведены зависимости средних величин теплового потока Q и плотности теплового потока q от скорости разливки для радиального кристаллизатора. Эти зависимости выражаются функциями, близкими к линейным. При увеличении скорости вытягивания слитка от 0,1 до 0,8 м/мин тепловой поток и плотность теплового потока увеличивается примерно в 2,2 раза. При скорости вытягивания 0,8 м/мин среднее значение теплового потока достигает величины 3,2 МВт, а плотность теплового потока составляет 0,71 МВт/м².

Проведено несколько серий экспериментов по калориметрированию длинного кристаллизатора с бронзовыми узкими стенками при разливке слябов сечением $0,25 \times 1,71$ м². В кристаллизаторе длиной 1200 мм с петлеобразной схемой разводки измерялся общий расход воды, что позволяло оценить величины тепловых потоков, средние по всей поверхности кристаллизатора, без разделения по узким и широким граням. При скорости разливки 0,6 м/мин величина среднего теплового потока менялась в пределах 3,2–3,5 МВт, а плотность теплового потока составляла $0,72 \div 0,81$ МВт/м².

Проведена серия экспериментов в течение разливки 91 плавки в кристаллизаторе с бронзовыми узкими стенками для сечения слитка $0,25 \times 1,55$ м² при изменении скорости разливки. Полученные результаты сравнивались с аналогичными результатами для медного кристаллизатора.

При кампании 10 плавок средний тепловой поток в медном кристаллизаторе был выше, чем в кристаллизаторе с бронзовыми стенками примерно на 6–7 %. При кампании 30 и 50 плавок эти зависимости сближаются и разница не превышает 2 %, что уже сравнимо с относительной погрешностью определения величины плотности теплового потока. При изменении скорости вытягивания слитка от 0,5 до 0,8 м/мин,



Рис. 14. Зависимость Q (1) и q (2) от скорости разливки

т.е. в 1,6 раза, средняя плотность теплового потока возрастает в обоих кристаллизаторах примерно на 7,3–7,8 %.

На рис. 15 представлена зависимость средней плотности теплового потока от скорости вытягивания слитка для кампании 30 плавок.

Небольшая разница в результатах объясняется, по-видимому, тем, что плотность теплового потока по узким граням существенно ниже, чем по широким, а теплоемкость по узким граням составляет меньшую долю от общего теплоемкости в кристаллизаторе. В результате этого замена материала (меди) на узких рабочих стенках кристаллизатора бронзой незначительно повлияла на характер зависимости средней плотности теплового потока от скорости вытягивания слитка.

На радиальной машине НИМК проводилось калориметрирование короткого кристаллизатора длиной 700 мм. Особенностью проведенных экспериментов являлось раздельное измерение теплотехнических параметров для каждой грани кристаллизатора. На рис. 16 представлена зависимость плотности теплового потока от скорости вытягивания для широкой грани слитка сечением $0,25 \times 1,85 \text{ м}^2$ при разливке стали марки 3С.

Из графика следует, что плотность теплового потока на стороне большого радиуса R больше, чем на стороне малого радиуса r , превышение составляет $\sim 10 \div 14 \%$. Это можно объяснить, очевидно, лучшими условиями контакта между затвердевающей коркой слитка и стенкой кристаллизатора на стороне большого радиуса под воздействием ферростатического давления.

При увеличении скорости разливки от 0,57 до 0,87 м/мин плотность теплового потока возрастает: для стороны малого радиуса от 0,89 до $1,23 \text{ мВт}/\text{м}^2$, т.е. примерно на 38 %; для стороны большого радиуса от 1,06 до $1,4 \text{ мВт}/\text{м}^2$, т.е. на 32 %.

Средние значения плотности теплового потока для короткого кристаллизатора несколько выше, чем для длинного.

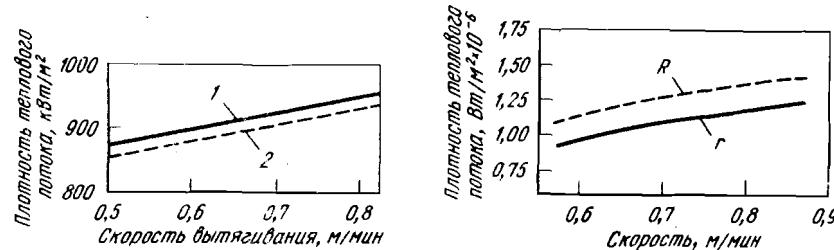


Рис. 15. Зависимость плотности теплового потока от скорости разливки в кристаллизаторе:
1 – медный; 2 – с бронзовыми узкими стенками

Рис. 16. Зависимость q от скорости для короткого кристаллизатора

Результаты исследования короткого кристаллизатора получены для небольшой серии плавок, поэтому требуют дальнейшего уточнения.

Полученные результаты экспериментальных исследований тепловой работы кристаллизаторов и выявленные основные закономерности теплообмена могут быть использованы при проектировании новых установок, а также при освоении и совершенствовании работы действующих МНЛЗ для повышения их производительности, качества непрерывных слитков, а также при разливке новых марок сталей и сечений заготовок. К тому же информация о тепловой работе кристаллизатора является предпосылкой для оптимизации работы всей МНЛЗ.

§ 4. МЕТОДИКА ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА КРИСТАЛЛИЗАТОРА

В инженерной практике при анализе тепловой работы кристаллизатора наиболее часто приходится решать задачи расчета расхода охлаждающей воды, скорости ее движения в каналах рабочих стенок кристаллизатора, а также определения температуры поверхности слитка на выходе из кристаллизатора.

Более редко встречается задача расчета температуры поверхности рабочей стенки кристаллизатора.

В рассматриваемой методике использованы основные положения, известные из литературных источников, а также приведены некоторые результаты исследований, проводимых в Липецком политехническом институте*.

1. Обычным методом исследования тепловой эффективности кристаллизатора как теплообменника является его калориметрирование. Средняя плотность теплового потока через рабочие стенки кристаллизатора связана с измеряемыми величинами расхода охлаждающей воды и разностью температур воды на входе и выходе кристаллизатора зависимостью (2).

Поверхность контакта между оболочкой слитка и рабочими стенками кристаллизатора можно определить по формуле:

$$F_K = [b_1 - \frac{b_1 - b_2}{L_K} (L_K - L_a) + b_2] L_a + [a_1 - \frac{a_1 - a_2}{L_K} (L_K - L_a) + a_2] L_a,$$

где b_1 , b_2 – размеры широкой грани слитка вверху и внизу кристалли-

* Методика составлена В. И. Дождиковым.

затора, м; a_1 , a_2 – размеры узкой грани вверху и внизу кристаллизатора, м; L_k , L_a – общая и активная высота стенок кристаллизатора, м.

Как показывают опыты, при постоянном значении уровня металла в кристаллизаторе (т.е. при условии $L_a = \text{const}$) основное влияние на теплоотвод в нем оказывает скорость вытягивания слитка v .

На основе экспериментальных данных было получено уравнение (3), где значения A и n зависят от типоразмера слитка, длины рабочих стенок кристаллизатора, химического состава стали и свойств шлакообразующей смеси. По опытным данным для МНЛЗ криволинейного типа $A = 953$; $n = 1/3$.

Из уравнений (2) и (3) следует, что $G_b \rho C \Delta t / F_k = A v^n$. Поэтому величина расхода воды определяется как

$$G_b = A F_k v^n / \rho C \Delta t. \quad (4)$$

Разность температур охлаждающей воды $\Delta t = t_b'' - t_b'$.

При постоянном значении температуры на выходе t_b'' , ограничиваемом по условиям накипеобразования, уравнение (4) можно рассматривать как зависимость расхода охлаждающей воды G_b от температуры воды на входе в кристаллизатор (t_b'). Очевидно, что при уменьшении t_b' можно уменьшить расход охлаждающей воды на кристаллизатор и, следовательно, снизить энергетические затраты на привод насосов.

Объемный расход воды связан со скоростью движения воды по каналам рабочих стенок кристаллизатора, т.е. $G_b = S w_b$, где S – общая площадь проходного сечения каналов, м^2 ; w_b – скорость движения воды, $\text{м}/\text{с}$.

Для толстостенных кристаллизаторов с цилиндрическими отверстиями в рабочих стенках $G_b = (\pi d^2 / 4) m w_b$, где d – диаметр каналов, м; m – общее количество каналов в стенках кристаллизатора.

Отсюда скорость движения воды

$$w_b = 4 G_b / \pi d^2 m. \quad (5)$$

По формуле (5) проверяют правильность расчета G_b , так как расход охлаждающей воды должен обеспечивать скорость движения в каналах $\geq 2 \text{ м}/\text{с}$ для предотвращения частичного закипания воды. В случае, если получается расчетное значение $w_b \leq 2 \text{ м}/\text{с}$, то принимают величину G_b , соответствующую граничной скорости $w_b = 2 \text{ м}/\text{с}$.

2. Для расчета температуры поверхности слитка t_p на выходе из кристаллизатора можно воспользоваться вторым уравнением системы (1), откуда

$$t_p = t_c - q (\xi / \lambda_m). \quad (6)$$

Известна зависимость $q = D \tau^{-0.5}$, где D – численный коэффициент пропорциональности. Если τ_k – время

пребывания в кристаллизаторе поперечного сечения слитка, разливаемого с постоянной скоростью v , то для среднего значения плотности теплового потока с учетом уравнения (3)

$$\frac{1}{\tau_k} \int_0^{\tau_k} D \tau^{-0.5} d\tau = A v^n.$$

Решив это уравнение относительно D , получим:

$$D = (A v^n / 2) \tau_k^{0.5}.$$

Тогда уравнение (7) запишется в виде:

$$q = 1/2 (A v^n \tau_k^{0.5} \tau^{-0.5}). \quad (8)$$

С учетом того, что $\tau_k = L_a / v$, а $\tau = z / v$, где z – координата вдоль направления вытягивания слитка ($z = 0$ на уровне металла в кристаллизаторе), уравнение (8) преобразуется в виде:

$$q = 1/2 (A v^n L_a^{0.5} z^{-0.5}). \quad (9)$$

Рост толщины оболочки слитка ξ при ее формировании в кристаллизаторе с достаточной точностью описывается по "закону квадратного корня".

Подставив значение q и ξ в формулу (6), после преобразований получим зависимость для расчета температуры поверхности слитка:

$$t_p = t_c - \frac{A v^n}{2 \lambda_M} k_3 \left(\frac{L_a}{v} \right)^{0.5}. \quad (10)$$

3. Температуру поверхности рабочей стенки кристаллизатора на стороне охлаждающей воды можно найти из пятого уравнения системы (1):

$$t_2 = t_b + (q_{cp} / \alpha_b). \quad (11)$$

При скоростях движения воды более $4 \text{ м}/\text{с}$ и турбулентном режиме ($Re > 10^4$) α_b можно определить на основе известной критериальной зависимости для вынужденной конвекции.

При скоростях движения воды менее $2 \text{ м}/\text{с}$ α_b можно определить по данным А. А. Скворцова и А. Д. Акименко.

Температура охлаждающей воды, входящая в формулу (11) и служащая определяющей температурой для расчета критериев подобия в уравнении критериальной зависимости для вынужденной конвекции, может быть найдена как среднеарифметическая по длине канала, т.е. $t_b = (t_b' + t_b'')/2$.

Среднюю плотность теплового потока q_{cp} определяют по уравнению (3), а температуру рабочей поверхности стенки кристаллизатора, контактирующей со слитком, рассчитывают из четвертого уравнения системы (1):

$$t_1 = t_2 + q_{cp} (\delta_{ct}/\lambda_{ct}). \quad (12)$$

На основе описанного алгоритма тепловых расчетов можно составить программу для расчетов на ЭВМ.

Пример теплового расчета

Данные для расчета: сталь марки ЗСП разливается в слитки с размерами поперечного сечения $1,55 \times 0,25 \text{ м}^2$ со скоростями вытягивания 0,6 и 0,8 м/мин. Длина кристаллизатора $L_k = 1,2 \text{ м}$; активная длина кристаллизатора $L_a = 1,137 \text{ м}$; размеры внутренней полости кристаллизатора в верхней его части: $b_1 = 1,582 \text{ м}$; $a_1 = 0,260 \text{ м}$, в нижней части: $b_2 = 1,563 \text{ м}$; $a_2 = 0,257 \text{ м}$.

Тип кристаллизатора – сборный толстостенный с рабочими медными стенками, диаметр каналов для охлаждающей воды $d = 0,02 \text{ м}$, число каналов по периметру кристаллизатора $m = 94$ шт. Температура охлаждающей воды на входе в кристаллизатор $t'_B = 20^\circ\text{C}$, на выходе из кристаллизатора $t''_B = 50^\circ\text{C}$.

Необходимо определить: скорость движения w_B и расход охлаждающей воды G_B , температуру поверхности слитка на выходе из кристаллизатора t_π .

Для этого вычисляется площадь контакта слитка с кристаллизатором:

$$\begin{aligned} F_k &= [b_1 - \frac{b_1 - b_2}{L_k} (L_k - L_a) + b_2] L_a + [a_1 - \frac{a_1 - a_2}{L_k} \times \\ &\times (L_k - L_a) + a_2] L_a = [1,582 - \frac{1,582 - 1,563}{1,2} (1,2 - 1,137) + \\ &+ 1,563] 1,137 + [0,26 - \frac{0,26 - 0,257}{1,2} (1,2 - 1,137) + 0,257] 1,137 = \\ &= 4,129 \text{ м}^2. \end{aligned}$$

Расход воды для охлаждения кристаллизатора для двух заданных значений скорости вытягивания

$$G_{0,6} = \frac{A v^n F_k}{\rho C (t''_B - t'_B)} = \frac{953 \cdot 0,6^{1/3} \cdot 4,129}{4,187 \cdot 994,7 (50 - 20)} =$$

$$= 0,027 \text{ м}^3/\text{с} = 95,6 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$G_{0,8} = \frac{953 \cdot 0,8^{1/3} \cdot 4,129}{4,187 \cdot 994,7 (50 - 20)} = 0,029 \text{ м}^3/\text{с} = 105,2 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

По формуле (5) рассчитываем скорость движения охлаждающей воды в каналах рабочих стенок кристаллизатора для наибольшего из полученных расходов:

$$w_B = \frac{4G_{0,8}}{\pi d^2 m} = \frac{4 \cdot 0,029}{3,14 \cdot 0,02^2 \cdot 94} = 0,98 \text{ м/с.}$$

Так как расчетное значение w_B получилось меньше 2 м/с, то необходимо принять величину скорости, равную 2 м/с, и по ней определить расход воды:

$$G_B = \frac{\pi d^2}{4} m w_B = \frac{3,14 \cdot 0,02^2}{4} \cdot 94 \cdot 2 = 0,059 \text{ м}^3/\text{с} = 212,5 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

При определении температуры поверхности слитка необходимо знать температуру солидуса. Для заданной марки стали можно принять $t_c = 1495^\circ\text{C}$.

Из формулы квадратного корня в пределах кристаллизатора $k_3 = 0,025 \text{ м/мин}^{1/2}$; $\lambda_M = 30 \text{ Вт/(м·К)}$.

Для заданных значений скорости вытягивания по формуле (10) определяется соответствующее значение температуры поверхности слитка на выходе из кристаллизатора:

$$\begin{aligned} t_\pi(0,6) &= t_c - \frac{A v^n}{2 \lambda_M} k_3 \left(\frac{L_a}{v} \right)^{0,5} = \\ &= 1495 - \frac{953 \cdot 0,6^{1/3} \cdot 10^3}{2 \cdot 30} 0,025 \left(\frac{1,137}{0,6} \right)^{0,5} = 1035^\circ\text{C}; \\ t_\pi(0,8) &= 1495 - \frac{953 \cdot (0,8)^{1/3} \cdot 10^3}{2 \cdot 30} 0,025 \left(\frac{1,137}{0,8} \right)^{0,5} = 1056^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Полученные значения температуры поверхности могут служить исходными величинами для дальнейшего расчета ЗВО.

Глава 4. ЗОНА ВТОРИЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

§ 1. ПРИНЦИП РАБОТЫ ЗВО

Зона вторичного охлаждения располагается на отрезке технологической линии от кристаллизатора до тяущих валков (см. рис. 1). В редких случаях допускается продолжение ЗВО за тяущими валками. За зоной вторичного охлаждения располагается зона охлаждения слитка на воздухе.

Назначение ЗВО – дальнейшее затвердевание непрерывного слитка после выхода его из кристаллизатора. В пределах этой зоны необходимо решить две основные задачи: обеспечить отвод тепла из внутренней жидкой зоны слитка; сохранить форму слитка.

В соответствии с этим в ЗВО предусмотрена система охлаждения слитка (например, форсуночная), а также поддерживающая система (роликовая и др.). Из всего количества тепла, отводимого от непрерывного слитка в пределах МНЛЗ, на долю зоны вторичного охлаждения приходится до 50 %. Охлаждение слитка в ЗВО может проводиться водой или другими теплоносителями. Наибольшее распространение получило водяное охлаждение, так как по сравнению с другими веществами вода обладает рядом преимуществ: дешевизной, доступностью, нейтральностью, хорошими теплотехническими свойствами, в частности, высоким значением теплоемкости. Кроме того, при перекачивании воды значительно меньше энергетические затраты по сравнению с газообразными веществами. Недостатком водяного охлаждения является трудность регулирования на малых расходах. Кроме воды находят применение водяной пар, воздух и различные смеси.

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

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

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

До настоящего времени более широкое распространение получили ЗВО открытого типа с роликофорсуночным охлаждением непрерывнолитой заготовки.

Крупные промышленные установки такого типа работают на Новолипецком металлургическом комбинате, заводе "Азовсталь", Череповецком металлургическом комбинате и ряде других.

По мере развития способа непрерывной разливки стали применялись различные методы водяного охлаждения: струйное, форсуночное, роликофорсуночное, форсуночно-брюсьевое, роликовое (бесфорсуночное), панельное. Эти способы отличаются интенсивностью и расходами воды.

Для сравнительного анализа удобнее применять величину плотности орошения g_F , которая характеризует собой объемный расход охлаждающей воды, попадающей на единицу поверхности слитка: $g_F = G_B/F$.

При различных способах охлаждения величина плотности орошения может изменяться в пределах $4 \div 10 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ и более. Во многих практических случаях для анализа интенсивности охлаждения применяются удельные расходы воды, отнесенные к единице массы охлаждаемого металла. В общем удельные расходы изменяются в пределах $g = 0,5 \div 5,0 \text{ л}/\text{кг}$ и более.

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

Форсуночное охлаждение позволяет снизить интенсивность охлаждения, удельные расходы воды при этом составляют $1 \div 2 \text{ л}/\text{кг}$.

Ролико-форсуночное охлаждение предусматривает подачу воды, распыляемой форсунками, на поверхность слитка между опорными роликами поддерживающей системы. Этот способ позволяет обеспечить "смягченный" режим охлаждения с удельными расходами воды $0,5 \div 1,0 \text{ л}/\text{кг}$.

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

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

Экранный способ охлаждения представляет систему закрытого типа. Для охлаждения слитка в ЗВО устанавливаются водоохлаждаемые экраны, окружающие все грани слитка. Отдельные секции экранов выполнены подобно кристаллизатору из толстостенной медной облицовки, стянутой стальным корпусом. Экраны обеспечивают мягкое и наиболее равномерное охлаждение поверхности непрерывного слитка, но при их использовании значительно снижается интенсивность теплоотвода, что приводит к углублению жидкой фазы на $10 \div 15 \%$ 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 зону вторичного охлаждения разделять на три участка с разными соотношениями по расходу охлаждающей воды, % от общего расхода воды в ЗВО: участок I – $(50 \div 60)$ от общего расхода воды в ЗВО; участок II – $(25 \div 30)$; участок III – $(15 \div 20)$.

Для слитков прямоугольного сечения отношение расхода воды на широкие грани к расходу на узкие грани не превышает 4,5 – 5. Часто охлаждение узких граней предусматривается только на первом верхнем участке, а далее обеспечивается охлаждение водой только широких граней. В криволинейных установках на широкие грани меньшего радиуса r расход воды устанавливается примерно на 20 % меньше, чем на широкие грани большего радиуса R .

Одно из основных требований к системе ЗВО заключается в том, чтобы ее длина обеспечивала полное затвердевание слитка до входа его в тянувшую клеть. В противном случае при обжатии слитка с незатвердевшей сердцевиной в его сечении могут образоваться внутренние трещины. Таким образом, протяженность ЗВО является одним из важнейших конструктивных параметров. Суммарная длина кристаллизатора и зоны вторичного охлаждения должна быть не менее, чем глубина жидкой фазы в слитке.

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

Конструкция ЗВО и режим работы определяются маркой стали, профилем и размерами слитка, скоростью разливки.

В зависимости от марок сталей и их физических свойств определяется способ охлаждения. На основе практического опыта для различных сталей устанавливаются нормы вторичного охлаждения – удельные расходы воды и распределение по высоте зоны. Стали, обладающие значительной прочностью при температурах, близких к температуре затвердевания, и не претерпевающие фазовых превращений при остывании, можно охлаждать интенсивно. Например, наиболее интенсивный струйный способ охлаждения применим для сталей austenитного класса. Многие же стали, наоборот, нельзя охлаждать с высокой интенсивностью, так как при этом возможно появление внутренних трещин.

Для некоторых углеродистых сталей рекомендуются режимы охлаждения с $g = 1,1 \div 1,25 \text{ л}/\text{кг}$. Отмечается, что при отливке слябов с такими расходами исключается образование осевых трещин на торцах слябов. По зарубежным данным подобные режимы рекомендуются при отливке крупных слябов сечением $2030 \times 305 \text{ мм}$.

Для углеродистых и низколегированных сталей наиболее рациональным является *смягченный режим охлаждения* с $g = 0,65 \div 0,8 \text{ л}/\text{кг}$.

Мягкие режимы охлаждения, обеспечиваемые при экранном способе, применяются для высокуглеродистых, легированных и других специальных марок сталей, для которых уже при $g = 0,5 \text{ л}/\text{кг}$ может появиться опасность образования внутренних трещин.

Для непрерывной разливки высококачественных сталей очень важно, чтобы система вторичного охлаждения предусматривала возможность

регулирования интенсивности охлаждения, начиная с момента начала разливки.

Под *рациональным режимом охлаждения* обычно понимают такое распределение интенсивности теплоотвода вдоль технологической оси МНЛЗ, при котором качество получаемого непрерывного слитка удовлетворяет определенным требованиям по основным показателям для заданной производительности машины.

Для слитков разного сечения заданной марки стали требуется свой рациональный режим охлаждения, поэтому интенсивность вторичного охлаждения и расходы воды должны быть приспособлены к размерам и профилям отливаемых заготовок.

В квадратных сечениях количество отводимого тепла быстро уменьшается по мере увеличения глубины жидкой зоны, поскольку периметр этой зоны значительно уменьшается с изменением глубины.

Напротив, в прямоугольных сечениях указанная зона приобретает форму клина, ширина которого очень медленно уменьшается с увеличением глубины. По этой причине поверхность жидкой зоны также сокращается медленно вплоть до полного затвердевания. Следовательно, для квадратных сечений слитков интенсивность вторичного охлаждения должна постепенно уменьшаться по мере приближения к границе жидкой зоны, а для прямоугольных сечений, у которых отношение между шириной и толщиной больше, интенсивность охлаждения должна, напротив, оставаться практически постоянной вплоть до полного затвердевания слитка. При изменении сечений стремится, чтобы конструкция ЗВО обеспечивала возможность быстрой перестройки.

Большое влияние на ход затвердевания слитка 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 слитком, 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. Например, для одинаковой скорости разливки 0,77 м/мин при снижении удельных расходов воды с 5 до 0,9 л/кг толщина корочки на выходе из кристаллизатора уменьшается по широкой грани с 43 до 30 мм, а по узкой – с 34 до 30 мм. 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 подбоем" снизу).

Чтобы центрировать грани слитка относительно оси машины и предох-

ранить их от выпучивания под действием ферростатического давления, в МНЛЗ устанавливается поддерживающая система различной конструкции.

По мере развития МНЛЗ для различных установок применялись следующие основные виды поддерживающей системы: брусьевая (или рельсовая), роликовая, шагающие балки, экранная и др.

Брусьевая поддерживающая система была разработана в первый же период освоения непрерывной разливки. Она сравнительно проста в изготовлении и эксплуатации, обеспечивает хорошую жесткость. Брусья располагаются вдоль движения слитка в несколько рядов по его ширине. В промежутках между брусьями устанавливаются форсунки. Охлаждение брусьев производится за счет воды для охлаждения слитка. До настоящего времени брусьевая система находит широкое применение в машинах вертикального типа. Однако при движении слитка возникают значительные силы трения о брусья, что существенно затрудняет процесс вытягивания и создает дополнительные напряжения в корочке слитка. Поэтому общая протяженность брусьевых секций имеет ограниченную длину.

На следующем этапе развития МНЛЗ широкое применение получила

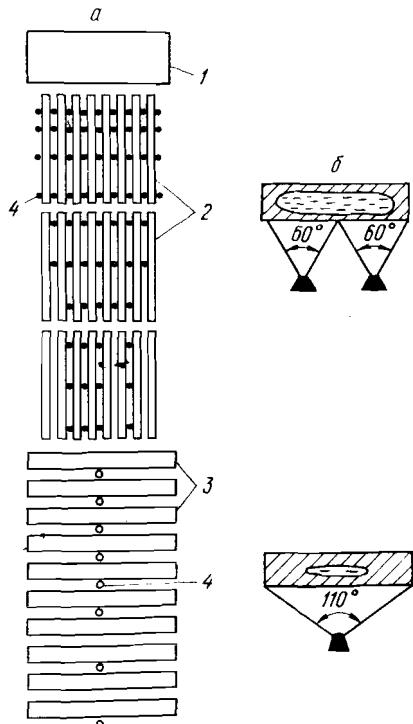


Рис. 17. Схема поддерживающей системы зоны вторичного охлаждения (а) и расположение форсунок по ширине слитка с углами раскрытия 60° и 110° (б):
1 – кристаллизатор; 2 – брусьевые секции; 3 – роликовые секции; 4 – форсунки

роликовая поддерживающая система. Ролики изготавливаются из специальных сталей с внутренним или внешним водяным охлаждением. Они располагаются поперек слитка с определенным шагом и врачаются вдоль его движения, что обеспечивает непрерывность и плавность процесса вытягивания слитка, значительно снижает силы трения о поверхность слитка. Вместе с тем, при отливке слябов большой ширины (до 2 м и более) ролики большой длины не обеспечивают достаточной жесткости, что может привести к искажению профиля слитка.

При увеличении диаметра поддерживающих роликов значительно уменьшается зона орошения между ними, что может привести к местному разогреву поверхности слитка. Для сохранения необходимой жесткости часто применяют двойную систему роликов основных и подпорных, что усложняет конструкцию поддерживающей системы и затрудняет ее эксплуатацию. Роликовая поддерживающая система получила распространение в машинах криволинейного типа.

В мощных машинах вертикального типа находит применение комбинированная система, состоящая из брусьев и роликовых секций. Схема такого типа ЗВО показана на рис. 17, а. Брусьевые секции устанавливаются в верхней части машины, сразу за кристаллизатором, где толщина затвердевшей корочки слитка еще незначительна и, следовательно, особенно необходима достаточная жесткость поддерживающей системы для предохранения слитка от выпучивания. Далее в нижней части ЗВО располагаются роликовые секции.

В некоторых МНЛЗ конструкции УЗТМ применялись *шагающие балки* с водяным охлаждением. Однако они не получили широкого распространения, по-видимому, из-за сложности механической системы балок.

Водоохлаждаемые экраны, окружающие слиток со всех сторон, выполняют двойную функцию – как система охлаждения и поддерживающая система.

Для вторичного охлаждения непрерывного слитка чаще всего применяются системы форсунок. В зависимости от конструкции МНЛЗ, размеров слитков 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 слитка, возможность регулирования расхода воды в широких пределах.

Первый опыт освоения МНЛЗ показал, что обычные промышленные форсунки для мелкого распыла воды с малым диаметром сечения очень быстро засоряются, форсунки с большим диаметром выходного сечения не дают необходимого распыла факела. В связи с этим были разработаны специальные форсунки с механическим распылом.

Вначале широко использовались круглофакельные форсунки с углом раскрытия факела $\sim 60^\circ$. Центробежные форсунки с коническим факелом и червячным распылителем не обеспечивали необходимой равномерности орошения поверхности слитка.

В последнее время широкое применение находят широкоугольные плоскофакельные форсунки (например, щелевого типа) с углом раскрытия факела 90° и 120° , которые обеспечивают лучшее распределение воды по ширине крупных слябов. Особенно удобны подобные форсунки при установке на мощных МНЛЗ в узком межроликовом пространстве. На рис. 17,б показаны примерные схемы расположения форсунок по ширине слитка.

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 выравнивать график изменения температуры поверхности по длине слитка, а также повысить значение температуры поверхности в конце ЗВО.

Проводились многочисленные исследования по определению коэффициентов теплоотдачи для различных видов охладителей. Интенсивность охлаждения уменьшается в следующей последовательности: вода, водо-воздушная смесь, воздух при истечении через патрубок без форсунки, водяной пар, воздух.

Как показано в работе А. А. Скворцова и А. Д. Акименко, охлаждение непрерывного слитка насыщенным паром в принципе не отличается от водяного, интенсивность при этом изменяется незначительно. А применение перегретого пара энергетически невыгодно в связи с его большими расходами.

Применение вентиляторного воздуха не дает значительного увеличения интенсивности по сравнению со свободным воздушным охлаждением, но требует дополнительной установки вентиляторов. Применение компрессорного воздуха требует установки компрессорных агрегатов большой мощности, поэтому энергетически неоправдано. Были попытки применения паро-воздушной смеси, однако, этот способ не нашел широкого применения.

Возможность более тонкого регулирования расхода воды, а также снижения интенсивности вторичного охлаждения достигается при использовании комбинированного водо-воздушного охлаждения. Впервые этот способ был применён еще в 1958 году на заводе "Красное Сормово".

В настоящее время способ водо-воздушного охлаждения находит широкое промышленное применение у нас в стране и за рубежом. Он обладает рядом преимуществ перед водяным охлаждением: высокой эффективностью и равномерностью охлаждения, большой гибкостью в эксплуатации и регулировании, существенным снижением расхода воды,

стойкостью к засорению форсунки и, следовательно, меньшими требованиями к очистке воды, повышением надежности работы.

Для водо-воздушного охлаждения также разрабатывались специальные конструкции форсунок с подводом воздуха в том же направлении, что и вода, или под углом $60 \div 90^\circ$ к направлению подачи воды. Например, в одной из зарубежных работ описывается схема форсунки системы "Лехлер" с направлением потока воздуха перпендикулярно направлению воды; выходное сечение форсунки 20 mm^2 по сравнению с $3 \div 4 \text{ mm}^2$ в обычных форсунках. Однако такая форсунка обеспечивает мелкий распыл с размером капли 59 mkm по сравнению со 116 mkm при распылении воды, широкий диапазон регулирования расхода воды ($1 : 40$); благодаря сравнительно большому выходному сечению она не засоряется и не требует особой очистки воды.

По данным разных авторов соотношение вода -- воздух должно составлять $(1/2,5) \div (1/10)$ и может доходить до $1/20$. Расходы воды составляют $0,2 \div 12$, а расходы воздуха $150 \div 400 \text{ л/мин}$. Такие форсунки устанавливаются сбоку от заготовки около узких граней сляба и подают струи водо-воздушной смеси вдоль поверхности широких граней в зазоры между заготовкой и поддерживающими роликами параллельно осям роликов. Туманообразная водо-воздушная смесь заполняет все пространство в этом зазоре, выдувая избыток неиспаренной воды, скапливающейся в месте контакта роликов с заготовкой, что обеспечивает более равномерное и интенсивное охлаждение.

В то же время в некоторых исследованиях отмечается, что ввиду отклонения в распределении давления подаваемого воздуха, размер капель по ширине сляба не всегда одинаков, а распространение водяного тумана по ширине сляба часто неравномерно. Однако во всех случаях водо-воздушное охлаждение показало превосходство над форсуночным водяным охлаждением.

§ 2: ТЕПЛООБМЕН В ЗВО

Тепловые режимы вторичного охлаждения оказывают существенное влияние на производительность МНЛЗ и качество отливаемых непрерывных заготовок.

При переходе на повышенные скорости разливки очень важно изучить особенности процессов затвердевания и охлаждения, так как с повышением скорости существенно уменьшается толщина твердой корочки слитка, снижается ее механическая прочность, увеличивается вероятность прорыва.

Для дальнейшего повышения качества непрерывных слитков необходимо анализировать условия охлаждения, принципы и методы его организации, установить основные закономерности теплопередачи в ЗВО и

возможности управления тепловыми режимами охлаждения непрерывных слитков.

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

Теплотехнические параметры вторичного охлаждения и, в частности, распределение интенсивности охлаждения по длине и периметру слитка оказывает решающее влияние на качество отливок, их внутреннее строение (трещины, осевую рыхлость и др.).

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

Плотность теплового потока может быть определена по уравнению: $q = \alpha(T_p - T_b)$, где α – коэффициент теплоотдачи конвекцией от поверхности слитка к охлаждающей воде, $\text{Bt}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; T_p – температура поверхности слитка, К; T_b – температура охлаждающей воды, К.

Важнейшим параметром, определяющим режим вторичного охлаждения, является коэффициент теплоотдачи α на поверхности слитка, изучению которого посвящены работы многих исследователей.

Для водяного вторичного охлаждения основное значение имеет конвективный теплообмен при обтекании поверхности слитка водой, закономерности которого описываются критериальной зависимостью типа $Nu = f(Re)$. Согласно этому определяющим являются условия вынужденного движения пленки жидкости вдоль охлаждаемой поверхности непрерывного слитка.

В случае продольного обтекания плоскости α может быть определен по критериальной формуле М. А. Михеева:

$$Nu = c Re^n, \quad (13)$$

где $Nu = \alpha l / \lambda_b$ – критерий Нуссельта; $Re = w_b l / \nu_b$ – критерий Рейнольдса; l – характерный линейный размер; λ_b , ν_b – коэффициенты теплопроводности и кинематической вязкости для охлаждающей воды; c , n – опытные коэффициенты.

Однако расчеты α для случая турбулентного режима течения в пограничном слое дают завышенные результаты по сравнению с величинами, полученными в опытах. Это объясняется тем, что при обтекании поверхности слитка с высокой температурой ($900 \div 1100^\circ\text{C}$) происходит частич-

ное испарение воды и образование паровой пленки, значительно снижающей интенсивность теплоотдачи.

Теоретическая оценка коэффициентов теплоотдачи в ЗВО усложняется и 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 непрерывного слитка к воде в ЗВО протекает в очень сложных условиях и зависит от режимных факторов, определяющих гидродинамическую картину на охлаждаемой поверхности, и конструктивных параметров зоны.

На рис. 18 показана схема орошения слитка при ролико-форсуночном охлаждении в пространстве между опорными роликами. Видно, что наряду с орошением поверхности слитка 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 и зона свободной конвекции и излучения на воздухе. Самый большой теплоотвод осуществляется в зоне непосредственного орошения водой поверхности слитка. 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 пузырчатое кипение); стадия конвективной теплоотдачи без кипения.

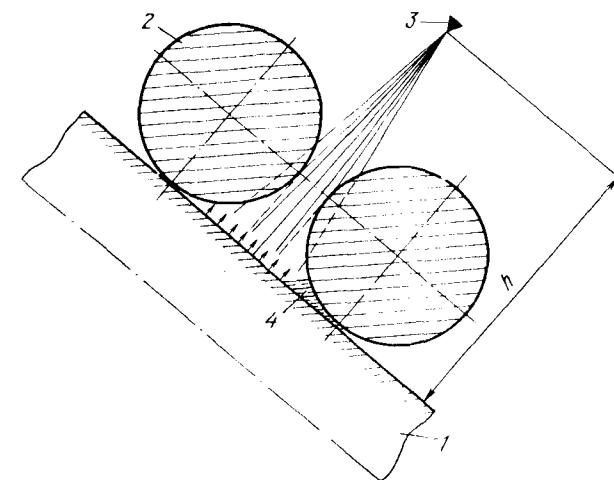


Рис. 18. Схема орошения слитка:
1 – слиток; 2 – опорные ролики; 3 – форсунка; 4 – слой воды

Е. Мизикаром выявлены три механизма отбора тепла в зависимости от температуры охлаждаемой поверхности:

— при температуре ниже критической (в опыте 565°C и выше 120°C) водяные капли проникают через паровую пленку, образующуюся в результате существования 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.

Вследствие значительного перепада температур на границе слиток — среда возникает пленочный режим кипения воды. В этой зоне теплообмен слитка определяется термическим сопротивлением оболочки металла и паровой пленки. В качестве эффективных средств разрушения паровой пленки иногда предлагается прерывистое охлаждение, разделенное небольшими зонами конвективного теплообмена на воздухе, изменение угла атаки струи по отношению к охлаждаемой поверхности. Однако наличие зон конвективного теплообмена на воздухе может привести к разогреву корочки слитка, поэтому является нежелательным.

Некоторыми зарубежными исследователями установлено, что в общем случае теплообмен в зоне орошения осуществляется путем конвективной теплоотдачи к охлаждающей воде, излучением между поверхностью слитка 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, 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 со слитком 16 % тепла, роль же конвективного теплообмена с окружающим воздухом незначительна.

Поток излучения с поверхности слитка, нагретого до 900÷1100°C, почти полностью экранируется паровой пленкой и слоем воды, покрывающих поверхность слитка при форсуночном водяном охлаждении.

На действующих установках в ЗВО основное количество тепла отводится от слитка охлаждающей водой и паром, получающимся при частичном испарении воды в условиях соприкосновения ее с раскаленной поверхностью слитка. Испарение части воды приводит к интенсивной теплоотдаче от поверхности слитка вследствие большой теплоты парообразования. Опытным путем установлено, что относительное количество испаряющейся воды составляет 8÷10 % при изменении плотности орошения в пределах 2÷7 м³/(м²·ч).

Коэффициент теплоотдачи, отнесенный к средней температуре охлаждающей воды без разделения процессов нагрева и испарения охлаждающей воды

$$\alpha = (Q_B + Q_{\text{пар}})/F(t_{\text{n}} - t_B), \quad (14)$$

где Q_B — количество тепла в единицу времени, идущее на нагрев охлаждающей воды, Вт; $Q_{\text{пар}}$ — количество тепла в единицу времени на испарение охлаждающей воды, Вт; F — поверхность вторичного охлаждения, м²; t_n — средняя температура поверхности слитка в зоне вторичного охлаждения, °C; t_B — средняя температура охлаждающей воды, °C.

По опытным данным при ролико-форсуночном и форсуночно-брюзгевом охлаждении α изменяется в пределах 140÷540 Вт/(м²·К) при изменении плотности орошения в пределах 1,5÷4,5 м³/(м²·ч). Такие значения α соответствуют плотности теплового потока при частичном испарении охлаждающей воды 5÷15 %.

В условиях форсуночного охлаждения продолжительность зоны пленочного кипения в значительной степени зависит от плотности орошения на единицу охлаждаемой поверхности g_F . Основной зависимостью, определяющей процесс теплоотдачи при водяном форсуночном охлаждении нагретых поверхностей, является зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности орошения: $\alpha = f(G_B/F)$.

Значения истинных α используются для анализа физической сущности процесса охлаждения. Средние величины коэффициента теплоотдачи являются исходной величиной, используемой при исследовании тепловой работы зоны вторичного охлаждения в целом в интервале температур поверхности от 900 до 1200°C.

Практической задачей создания оптимальных условий охлаждения слитка в зоне вторичного охлаждения является установление количественных соотношений между коэффициентами теплоотдачи и плотностью орошения.

В связи со сложностью процесса и невозможностью точной оценки влияния всех факторов при теоретических расчетах, часто в конкретных условиях экспериментально оценивают зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности орошения.

Установлено, что эта зависимость имеет почти линейный характер и может аппроксимироваться простым выражением:

$$\alpha_{\text{ср}} = k_B g_F, \quad (15)$$

где g_F — плотность орошения, м³/(м²·ч); k_B — коэффициент пропорциональности, определяемый из опыта.

По данным различных авторов для разных случаев $k_B = 50 \div 120$ (Вт·ч)/(м³·К).

Линейная зависимость может использоваться в рабочих диапазонах изменения плотности орошения примерно до 20 м³/(м²·ч). При повышении величины плотности орошения свыше 20 м³/(м²·ч) значение α практически стабилизируется.

Теплоотдача в ЗВО на криволинейных установках протекает в более сложных условиях, чем на вертикальных. Дополнительная сложность состоит в том, что криволинейная грань меньшего радиуса r охлаждается водой, поступающей в основном сверху, а грань большего радиуса R охлаждается водой, поступающей снизу. Это создает разные условия вынужденного движения пленки воды вдоль охлаждаемых поверхностей противоположных криволинейных граней и может привести к различным коэффициентам теплоотдачи при одинаковых значениях плотности орошения.

Экспериментальные данные показывают, что при одинаковой плотности орошения коэффициент теплоотдачи на грани r больше, чем на поверхности большего радиуса. Это объясняется тем, что на грани r больше относительное количество воды, превращающейся в пар, а также больше перепад температур воды.

Установлены опытные зависимости коэффициентов теплоотдачи от плотности орошения для криволинейных слитков:

$$\alpha^r = 60g_F^r; \quad \alpha^R = 50g_F^R. \quad (16)$$

При соблюдении равенства коэффициента теплоотдачи на противоположных сторонах криволинейного слитка получена зависимость между плотностью орошения для малого r и большого R радиусов:

$$g_F^r = 0,8g_F^R. \quad (17)$$

Особенности охлаждения поверхностного слоя слитка изучены еще недостаточно. Приводимые в литературе данные о взаимосвязи коэффициента теплоотдачи и плотности орошения поверхности значительно различаются, что затрудняет формулирование граничных условий при математическом моделировании процесса охлаждения слитка.

Полученные результаты исследований часто не учитывают экранирующего действия конструкции поддерживающей системы зоны вторичного охлаждения, в частности, экранирования роликами (см. рис. 18) или брусьями, которые могут изменить гидродинамическую картину на охлаждаемой поверхности слитка. В связи с этим при использовании экспериментальных зависимостей α от плотности орошения при отладке режимов вторичного охлаждения в реальных условиях работы МНЛЗ необходимо вводить соответствующие поправки, которые, очевидно, в каждом частном случае будут зависеть от конструктивного исполнения ЗВО, от типа поддерживающей системы и т.д.

Для водяного охлаждения применяемые способы отличаются интенсивностью и величиной коэффициента теплоотдачи α $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$:

Струйное охлаждение	$2000 \div 4000$
Форсуночное жесткое	$1000 \div 1500$

Ролико-форсуночное (смягченное)	$300 \div 500$
Роликовое (мягкое)	$200 \div 300$
Экранное	$100 \div 150$

В зоне вторичного охлаждения требуется поддерживать интенсивность охлаждения на таком уровне, чтобы при заданной производительности в конце зоны завершалось полное затвердевание слитка, а температура поверхности удерживалась на уровне не ниже 800°C , что способствует предотвращению появления трещин вблизи фронта кристаллизации. Интенсивность охлаждения не должна превышать оптимальные значения по качеству слитка и в то же время быть достаточной для обеспечения необходимой скорости разливки.

Опытами установлено, что имеется предел количества тепла, которое может быть отведено от непрерывного слитка. С увеличением количества охлаждающей воды увеличивается теплоотвод, что приводит к переохлаждению поверхности и может обусловить дефекты в структуре слитка. Таким образом, управление отводом тепла в зоне вторичного охлаждения может оказывать значительное влияние на качество непрерывных слитков.

Струйное охлаждение обеспечивает самую высокую интенсивность охлаждения, при этом отвод тепла в единицу времени в ЗВО больше, чем в кристаллизаторе. Так, при скорости разливки $0,5 \div 0,8 \text{ м/мин}$ в ЗВО $Q = 2 \cdot 10^6 \text{ Вт}$ (480 ккал/с). Удельные расходы воды при струйном охлаждении могут превышать 10 л/кг . Однако, как показывают многочисленные результаты исследований, пропорциональное увеличение теплоотвода с ростом удельных расходов происходит примерно до $g = 5,0 \text{ л/кг}$, а далее замедляется. Увеличение удельного расхода воды свыше $6,5 \div 7 \text{ л/кг}$ практически не влияет на величину теплоотвода. При изменении удельного расхода воды в пределах $2,5 \div 5,0 \text{ л/кг}$ величина $Q = (1 \div 2) \cdot 10^6 \text{ Вт}$.

При интенсивности струйного охлаждения, когда $\alpha = 2500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, в конце зоны $t_{\text{п}} = 250 \div 300^\circ\text{C}$, что приводит к возникновению значительных термических напряжений и внутренних трещин.

Форсуночное жесткое охлаждение с удельными расходами воды более 1 л/кг также приводит к резкому охлаждению поверхности.

Опыты показывают, что для предупреждения образования внутренних трещин удельные расходы воды должны быть $\leq 1 \text{ л/кг}$.

Ролико-форсуночное охлаждение обеспечивает более умеренную интенсивность охлаждения при $g \leq 1 \text{ л/кг}$. Теплоотвод значительно снижается по сравнению со струйным охлаждением, $Q = (0,4 \div 1,2) \cdot 10^6 \text{ Вт}$ ($100 \div 300 \text{ ккал/с}$). При $\alpha = 250 \div 500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ обеспечивается уровень $t_{\text{п}} = 600 \div 800^\circ\text{C}$ в конце зоны. Металл находится в зоне пластических деформаций, при этом улучшается качество слитка, снижается количество внутренних трещин, уменьшается искажение профиля заготовки.

Плотность орошения при ролико-форсуночном способе составляет $1,25 \div 3,5 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

При роликовом бесфорсуночном охлаждении часть воды попадает непосредственно на охлаждаемую поверхность, так что в чистом виде роликовое охлаждение осуществить практически трудно. Роликовый способ позволяет осуществить "мягкий" режим охлаждения слитка. Интенсивность роликового охлаждения в пределах плотности орошения от $3,0$ до $10 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ изменяется мало. Это создает благоприятные условия для равномерности охлаждения слитка. Но с другой стороны, при роликовом охлаждении невозможно обеспечить регулирования интенсивности охлаждения в широких пределах.

Экранное охлаждение по интенсивности эквивалентно охлаждению на воздухе в условиях свободной конвекции, что приводит к значительному разогреву поверхности слитка.

Основные способы охлаждения, которые применяются в настоящее время, можно разделить на следующие характерные режимы: охлаждение в паро-водяной среде; в пузырчатом слое воды; водо-воздушное охлаждение; паро-воздушное охлаждение; охлаждение на воздухе.

При интенсивном водяном охлаждении в паро-водяной среде на поверхности слитка скорость затвердевания несколько увеличивается, глубина жидкой фазы уменьшается. Но при этом на поверхности слитка 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 пузырчатом слое воды, при котором одновременно с выравниванием температур происходит равномерное медленное охлаждение слитка. Такой режим обеспечивает наилучшее качество слитков различных профилей и марок сталей.

Водо-воздушное охлаждение, находящее в последнее время все большее распространение, обеспечивает изменение в широких пределах $\alpha = 250 \div 500 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$ и выше. Охлаждающая вода распыляется струями воздуха на мельчайшие частицы. Образующееся при этом облако воздушно-водяной эмульсии переносится с большой скоростью по поверхности слитка, что увеличивает зону охлаждения, повышает его равномерность и регулярность. Более 95 % частиц воды имеет размер $< 100 \text{ мкм}$, 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°C не превышают 50°C и соответст-

венно снижаются величины термических напряжений, вызывающих появление трещин. Повышение скорости воздушного потока и расхода воздуха при неизменном расходе воды увеличивает теплоотвод с поверхности слитка. Таким образом, водо-воздушное охлаждение позволяет благодаря выравниванию температур получать заготовки с меньшими дефектами и высокой температурой поверхности в конце ЗВО.

Паро-воздушное и воздушное охлаждение характеризуются низкой интенсивностью. Для газообразных охладителей $\alpha = 150 \div 200 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$ и ниже, что приводит к разогреву поверхности слитка и, следовательно, к снижению качества отливки.

Влияние интенсивности теплоотдачи в зоне вторичного охлаждения на качество непрерывного слитка является важным практическим вопросом. При выборе режима охлаждения необходимо в первую очередь обеспечить условие, чтобы затвердевание слитка закончилось в пределах ЗВО. Однако при высокой интенсивности в случае струйного охлаждения из-за резкого снижения температуры поверхности образовались трещины. Недостаточная длина ЗВО или низкая интенсивность охлаждения может также привести к появлению внутренних трещин из-за давления валков на поверхность неполностью затвердевшего слитка, а также вследствие разогрева корочки на выходе слитка 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 и $\alpha = 150 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$ возникает осевая рыхłość в слитке. При повышении интенсивности охлаждения до значений $\alpha = 250 \div 300 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$ существенно улучшается макроструктура слитка, уменьшается осевая рыхłość и ликвация, снижается количество трещин и других дефектов.

По результатам многих исследований установлено, что скорость затвердевания слитков в ЗВО мало зависит от интенсивности вторичного охлаждения, а зависит, в основном, от толщины слитка. Следовательно, основную долю в теплоотводе составляет тепло, отводимое от твердой корки непрерывного слитка. По данным А. А. Скворцова и А. Д. Акименко увеличение α в 4 раза [от 500 до $2000 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$] приводит к сокращению длины жидкой фазы всего лишь на 15 %, следовательно, иногда можно пренебречь влиянием α на затвердевание. Режимы охлаждения необходимо выбирать с учетом марки стали, размеров, профиля слитка и других факторов.

В литературе встречаются противоречивые данные по режимам охлаждения. Например, одни авторы рекомендуют усилить интенсивность охлаждения после окончания кристаллизации непрерывного слитка, а

другие – наоборот ослабить ее в конце периода охлаждения. Очевидно, этот вопрос требует дальнейшего изучения с учетом конкретных условий.

Важной практической задачей создания оптимальных условий охлаждения слитка в зоне вторичного охлаждения является установление количественных соотношений между расходами воды и коэффициентами теплоотдачи.

Последним этапом реализации выбранного оптимального режима охлаждения является выбор и расстановка форсунок или других устройств для подачи охладителя в ЗВО. Этим шагом добиваются максимального приближения действительного распределения плотности орошения к заданному.

Результаты многих исследований показали существенную зависимость коэффициента теплоотдачи от гидродинамической картины на поверхности слитка, которая, в свою очередь, зависит от давления воды перед форсункой, определяющего расходные и геометрические характеристики форсунок (углы раскрытия по вертикали и горизонтали факела); расстояния форсунки до орошающей поверхности; угла атаки струи охлаждающей поверхности; ориентации поверхности в пространстве; количества движения отдельных капель при приближении к поверхности нагрева; температуры охлаждаемой поверхности.

На основании экспериментов установлена зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры охлаждаемой поверхности, расстояния от форсунки до орошающей поверхности, угла атаки струи и других факторов. Максимальное значение коэффициента теплоотдачи наблюдается в центре факела.

За пределами действия факела форсунки в районе стекающей воды из-за образования буферной паровой или паровоздушной прослойки происходит снижение коэффициента теплоотдачи до значений $175 \div 230 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

В зоне орошения слитка форсункой существуют несколько основных параметров, влияющих на скорость теплоотдачи: интенсивность потока воды, размер капель и скорость их движения, угол разбрызгивания и эффект смачивания. Исследования коэффициента теплоотдачи при использовании плоскофакельных форсунок показали, что интенсивность теплообмена существенно зависит от скорости истечения воды из форсунки. При увеличении скорости истечения в 3 раза α возрастает в 2,5 раза.

Для более обоснованного выбора варианта вторичного охлаждения, определения интенсивности охлаждения слитка при проектировании МНЛЗ необходимы предварительные специальные исследования гидравлических и теплотехнических характеристик форсунок и других распыляющих устройств, применяемых в ЗВО.

В конце зоны вторичного охлаждения после полного затвердевания слитка прекращается принудительное водяное охлаждение. Эта область характеризуется свободным охлаждением слитка на воздухе. При вы-

ходе из зоны принудительного вторичного охлаждения непрерывный слиток продолжает охлаждаться за счет излучения и свободной конвекции.

Как показывают опыты, основное количество тепла отводится от слитка 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. Плотность теплового потока ($\text{Вт}/\text{м}^2$) при охлаждении на воздухе

$$q_B = \epsilon_M C_0 [(T_{\Pi}/100)^4 - (T_B/100)^4] + \alpha_K (T_{\Pi} - T_B), \quad (18)$$

где ϵ_M – степень черноты металла; T_{Π} , T_B – температура поверхности слитка и окружающего воздуха, К; α_K – коэффициент теплоотдачи конвекцией, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Формулу для расчета величины плотности теплового потока можно представить в виде:

$$q_B = \alpha_{\Sigma} (T_{\Pi} - T_B), \quad (19)$$

где суммарный коэффициент теплоотдачи, учитывающий передачу тепла излучением и конвекцией, определяется как $\alpha_{\Sigma} = \alpha_L + \alpha_K$,

$$\alpha_L = \frac{\epsilon_M C_0 [(T_{\Pi}/100)^4 - (T_B/100)^4]}{T_{\Pi} - T_B},$$

а α_K может определяться из критериальной зависимости для свободной конвекции типа $Nu = f(Gr; Pr)$.

Величина суммарного коэффициента теплоотдачи в зоне воздушного охлаждения может быть определена экспериментально с помощью формулы:

$$\alpha_{\Sigma} = q_B / (T_{\Pi} - T_B). \quad (20)$$

Ниже приведены значения суммарного коэффициента теплоотдачи при свободном охлаждении слитка на воздухе в зависимости от температуры поверхности слитка:

t_{Π} , °C	500	700	800	900	1000	1100
α_{Σ} , $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. .	38	57	72	97	120	150

В случае вынужденной конвекции коэффициент теплоотдачи может определяться по эмпирическим зависимостям:

$$\alpha_K = 6,16 + 4,18 w_B \quad \text{при } w_B \leq 5 \text{ м/с}; \quad (21)$$

$$\alpha_K = 7,52 w_B^{0,78} \quad \text{при } w_B > 5 \text{ м/с}, \quad (22)$$

где w_b – скорость вынужденного движения воздуха вдоль поверхности слитка.

При экранном охлаждении с помощью водоохлаждаемых поверхностей основное количество тепла передается излучением как и в случае охлаждения на воздухе. Интенсивность экранного охлаждения эквивалента охлаждению на воздухе в условиях свободной конвекции.

§ 3. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗВО

Знание основных теплотехнических закономерностей работы ЗВО позволяет совершенствовать работу действующих установок, а также прогнозировать изменение основных параметров при проектировании новых машин.

Для изучения работы ЗВО применяются методы промышленных экспериментов на действующих установках, проводятся лабораторные исследования на специальных стендах и физических моделях, широко используются расчетно-теоретические исследования, в том числе на основе метода математического моделирования с применением ЭВМ.

Наиболее эффективно применение комплексных экспериментально-теоретических исследований условий охлаждения непрерывного слитка.

При проведении теплотехнических исследований ЗВО необходимо решать следующие практические задачи:

- определение основных теплотехнических и технологических параметров ЗВО: общего теплосъема, коэффициентов теплоотдачи, расходов воды по секциям, количества и типа форсунок, схемы их расстановки и др.;

- установление зависимости основных режимных параметров (расходов воды, длины и ширины форсуночного охлаждения и др.) от скорости разливки, марки стали, сортамента заготовок и т.д.;

- определение зависимости интенсивности охлаждения от расхода охлаждающей воды, рекомендации по совершенствованию режимов охлаждения с целью уменьшения вероятности образования трещин и других дефектов непрерывного слитка.

Работы многих авторов посвящены изучению температурного поля непрерывного слитка, определению величины тепловых потоков и коэффициентов теплоотдачи, разработке тепловых режимов охлаждения слитков. Известны несколько методов определения α .

М. С. Бойченко и В. С. Рутес применяли косвенную методику, основанную на сопоставлении экспериментально измеренных температур поверхности слитка с расчетными при постоянных значениях коэффициента теплоотдачи до их совпадения.

А. А. Скворцов и А. Д. Акименко определяли α по тепловому балансу в ЗВО. Некоторые авторы определяли среднее по зоне значение коэффициента теплоотдачи в условиях действующих вертикальных МНЛЗ.

Во ВНИИМТе для определения α по секциям ЗВО использован принципиально новый подход, основанный на совмещенном (комплексном) использовании экспериментальных исследований температурного поля во внутренних точках непрерывного слитка и результатов восстановления граничных условий с помощью расчетов на ЭЦВМ. Сопоставление удельных расходов воды и восстановленного коэффициента теплоотдачи в каждой секции ЗВО позволяет получить обобщенную зависимость интенсивности теплообмена от режимных параметров, характерную для данной конструкции МНЛЗ.

Многие авторы определяли коэффициент теплоотдачи экспериментальным путем на специальных лабораторных стендах, которые имитировали условия теплообмена на поверхности слитка при форсуночном охлаждении.

Наиболее точные данные по теплообмену в ЗВО получаются на основании измерений температуры в условиях действующих МНЛЗ. Непосредственное измерение температурного поля в непрерывном слитке позволяет получить весьма ценную информацию о его тепловом состоянии, сделать выводы о качестве режимов охлаждения и на этом основании разработать практические рекомендации по совершенствованию конструкции и режимов работы ЗВО. Однако высокая температура расплавленной стали, ее высокая агрессивность, усадка при затвердевании, а также перемещение слитка в процессе разливки создают серьезные трудности при проведении подобных экспериментов. В связи с этим в литературе имеется сравнительно мало данных по температурным измерениям в непрерывном слитке.

По методике, применяемой в ЦНИИЧМ им. И. П. Бардина, платиновые термопары в защитных чехлах вводили в слиток через затравку снизу и измеряли температуру в 2 – 3 точках слитка на расстоянии 0,5 \div 0,7 м от затравки. В этом случае на результаты измерений оказывал влияние концевой эффект, который трудно учесть и оценить.

В работах О. В. Мартынова и др. использована новая методика с введением блока термопар сверху через кристаллизатор. Однако низкая стойкость применяемых в этих опытах кварцевых наконечников и незначительное удаление рабочих спаев термопар от блока (30 мм) ограничивают длительность измерений и могут также приводить к искажению результатов измерений из-за теплового влияния блока.

Более надежная методика разработана во ВНИИМТ и подробно изложена в работах Ю. А. Самойловича и др. В данной методике применены вольфрам-рениевые термоэлектроды, имеющие стабильную характеристику и высокие значения термо-Э.Д.С. в широком диапазоне температур (до 1600°C), что позволяет проводить измерения температур с большей точностью. Горячие спаи удалялись на расстояние 100 \div 120 мм от блока, и, следовательно, уменьшалось его тепловое влияние на показания термопар. Вывод свободных концов термопар осуществлялся через спе-

циальную штангу, покрытую огнеупорной обмазкой, длиной $1,7 \div 2,5$ м, что обеспечивало надежное удаление холодных спаев термопар от мениска жидкого металла и, тем самым, позволяло уменьшить влияние концевого эффекта.

Однако в настоящее время теплообмен в зоне вторичного охлаждения изучен еще недостаточно. В имеющихся литературных источниках по исследованию вторичного охлаждения рекомендации по оптимальным 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 непрерывного слитка. Мало данных по измерениям температурного поля в криволинейных слитках, по тепловым характеристикам форсунок и т.д.

Липецким политехническим институтом проводились экспериментальные исследования тепловой работы зоны вторичного охлаждения МНЛЗ

на действующих вертикальных и криволинейных машинах НЛМК и в лабораториях. Измерялись температуры на поверхности и во внутренних точках непрерывного слитка, анализировались гидравлические и теплотехнические характеристики форсунок, изучались возможности применения водо-воздушного охлаждения и др.

Измерения температур поверхности слитка проводились на вертикальных МНЛЗ с двумя и тремя брусьевыми секциями. Датчики устанавливали на семи уровнях: непосредственно под кристаллизатором, в конце 1, 2, 3 брусьевых зон, 4 и 5 роликовых зон охлаждения и в тянувшей клети. Схема расположения датчиков приведена на рис. 19.

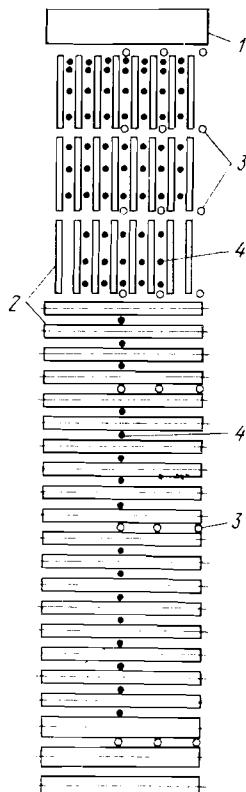


Рис. 19. Схема расположения пирометров в ЗВО:
1 – кристаллизатор; 2 – поддерживающая система
ЗВО; 3 – пирометры; 4 – форсунки

В качестве датчиков использовались радиационные пирометры ПРК-600 "Кварц" с пределами измерений $600 \div 2000^{\circ}\text{C}$. Закрепленные на штангах датчики помещали в водоохлаждаемый корпус, выходное сечение которого находилось в 10–15 мм от поверхности слитка. Поле излучения при этом имело диаметр 69 мм. Другой конец корпуса закрывался крышкой со штуцером для подвода сжатого воздуха. Схема установки пирометра показана на рис. 20. Сжатый воздух использовался для создания в полости корпуса избыточного давления, чтобы исключить попадание пара между датчиком и поверхностью излучения.

В специальных лабораторных опытах в интервале температур $715 \div 1018^{\circ}\text{C}$ была определена $\epsilon_m = 0,88$, которая использовалась далее для

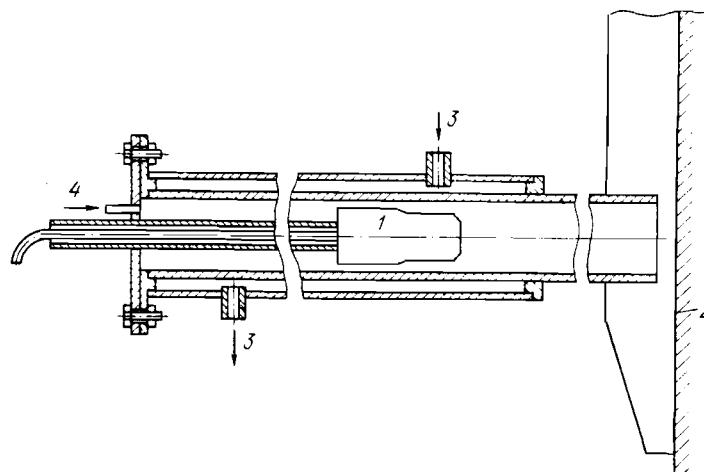


Рис. 20. Схема установки пирометра:
1 – пирометр; 2 – слиток; 3 – вода; 4 – воздух

перевода полученных радиационных температур в истинное. При обработке результатов измерений вводились соответствующие поправки на погрешность измерений.

Результаты измерений температур по длине слитка для разных точек его поверхности при скорости разливки 0,4 м/мин приведены на рис. 21. Анализ полученного графика показывает, что температура центра широкой грани под кристаллизатором составляет 1050°C ; на уровне конца второй секции она понижается до 865°C , что соответствует средней скорости охлаждения $17,6^{\circ}\text{C}/\text{мин}$. Между второй и четвертой секциями температура понизилась на 110°C и составила 755°C , что соответствует среднему темпу охлаждения $14,7^{\circ}\text{C}/\text{мин}$, а между датчиками четвертой и

пятой секции при отсутствии водяного охлаждения поверхность начала разогреваться, и ее температура повысилась на 115°C , что соответствует средней скорости разогрева $14,4^{\circ}\text{C}/\text{мин}$.

Температура угловой зоны слитка последовательно понижается от 1040°C под кристаллизатором до 840°C в конце пятой секции с различными средними скоростями охлаждения соответственно: 8; 11,5 и $3,3^{\circ}\text{C}/\text{мин}$.

Одновременное измерение температур центра широкой грани и угловой части слитка показало, что температура угла до конца четвертой секции выше температуры центра в конце второй секции на 90°C , в четвертой секции перепад температур достигает $70 \div 110^{\circ}\text{C}$, иногда до 200°C . После прохождения четвертой секции центр широкой грани слитка разогревается, в то время как угол продолжает охлаждаться, и уже в конце пятой секции центр становится горячее угла на $35 \div 75^{\circ}\text{C}$. Таким образом, проведенные измерения показали наличие неравномерности охлаждения слитка по его периметру и различие темпов охлаждения различных зон широкой грани слитка по высоте.

Данные рис. 22 показывают, что в брусьевых секциях в промежутках между брусьями температура определенного участка слитка может значительно изменяться в зависимости от того, подвергается ли он воздействию факела форсунки или находится в неорошающей области, если факелы двух последовательно расположенных по высоте форсунок не перекрывают друг друга. При неравномерности охлаждения температура

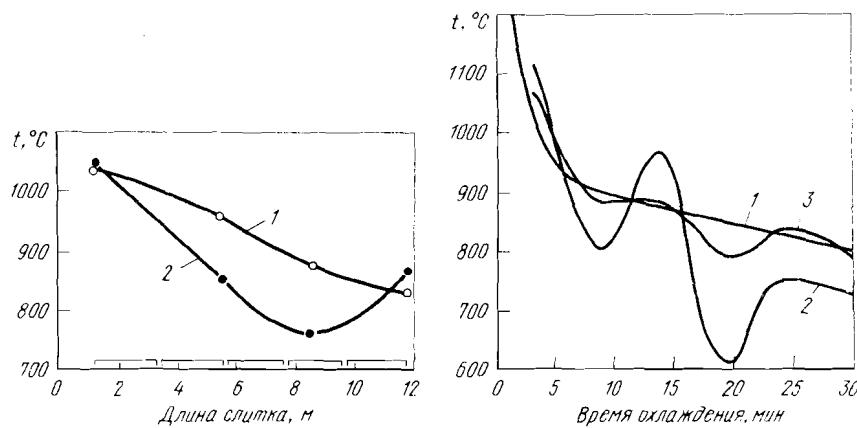


Рис. 21. Изменение температуры по длине слитка:
1 – угловая часть; 2 – центр широкой грани

Рис. 22. Изменение температуры оптимальной (1), до отработки режима (2) и после корректировки (3)

поверхности может резко изменяться в пределах $>200^{\circ}\text{C}$, что может привести к возникновению опасных термических напряжений.

На основе анализа полученных результатов была проведена корректировка расходов воды по секциям и предложена новая расстановка форсунок, что исключило переохлаждение поверхности металла при переходе из одной секции в другую и снизило неравномерность температур поверхности слитка.

На машинах вертикального типа НЛМК проводились измерения температурного поля во внутренних точках непрерывного слитка по методике, разработанной во ВНИИМТ с некоторыми усовершенствованиями.

Для измерения температур использовались вольфрам-рениевые термопары с термоэлектродами диаметром 0,35 мм. Отличительной особенностью было использование двух типов защиты термопар. Для защиты термопар во внутренних точках слитка применялись корундовые колпачки с толщиной стенки $1 \div 1,5$ мм, а для термопар вблизи поверхности – кварцевые колпачки с толщиной стенки в районе рабочего спая $0,3 \div 0,5$ мм. Малая инерционность такой защиты позволяла осуществлять измерение температуры вблизи поверхности слитка с большей точностью.

Блок термопар вводили при отливке последнего сляба серии плавок. Прежде всего блок разогревали в пламени газовой горелки в течение $10 \div 15$ мин до температур $700 \div 800^{\circ}\text{C}$. После его ввода и вмораживания отливали еще около 2 м слитка для исключения влияния на измерения концевого эффекта. После прекращения разливки слиток протягивали вдоль технологической оси МНЛЗ до тянущей клети. Скорость вытягивания и расходы воды в ЗВО поддерживались постоянными с момента ввода блока. После выдачи слитка из МНЛЗ его складировали в середину штабеля и продолжали измерения температур в течение 18,5 ч.

Опыт проводился при разливке стали ЗСП в слябы сечением $0,24 \times 1,71 \text{ м}^2$ при скорости вытягивания $0,43 \text{ м}/\text{мин}$. На складе сляб разрезали и находили точное расположение рабочих спаев термопар относительно граней слитка.

На рис. 23 показана схема расположения термопар в сечении слитка,

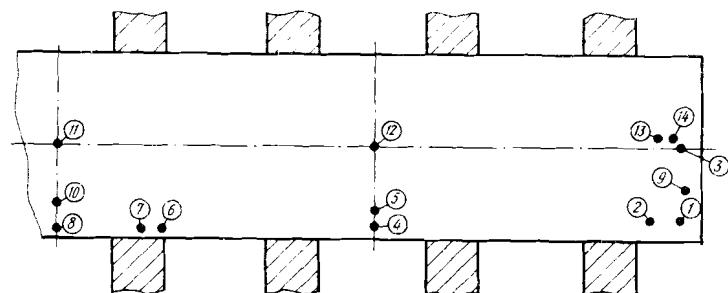


Рис. 23. Схема расположения термопар в сечении слитка, цифры – номера термопар

которые вблизи поверхности фиксировали температуры различных по характеру охлаждения участков периметра слитка: на узкой грани, угловой части широкой грани, между брусьями и под бруском на широкой грани. Термопары в центре широкой грани между брусьями, на четверти ее ширины между брусьями и в центре узкой грани позволяли исследовать процесс охлаждения в трех продольных сечениях слитка. Результаты измерений показаны на рис. 24, 25.

В ЗВО показания термопары 4, расположенной между брусьями, носят волнообразный характер. Впадины волн с учетом тепловой инерции металла примерно соответствуют центральным участкам областей орошения форсунок, где наблюдается максимальная плотность орошения, а их гребни соответствуют зонам разрыва между этими областями. Колебания температур при форсуночно-брусьевом охлаждении ощущаются на глубине 34 мм (точка 5). В центре слитка (точка 12) до конца первой секции ЗВО поддерживается температура на $20 \div 30^\circ\text{C}$ выше температуры ликвидуса, затем в течение 2 мин она падает на $50 \div 60^\circ\text{C}$ и далее сохраняет примерно одно и то же значение до выхода из третьей секции. Скорость охлаждения центра слитка после его полного затвердевания увели-

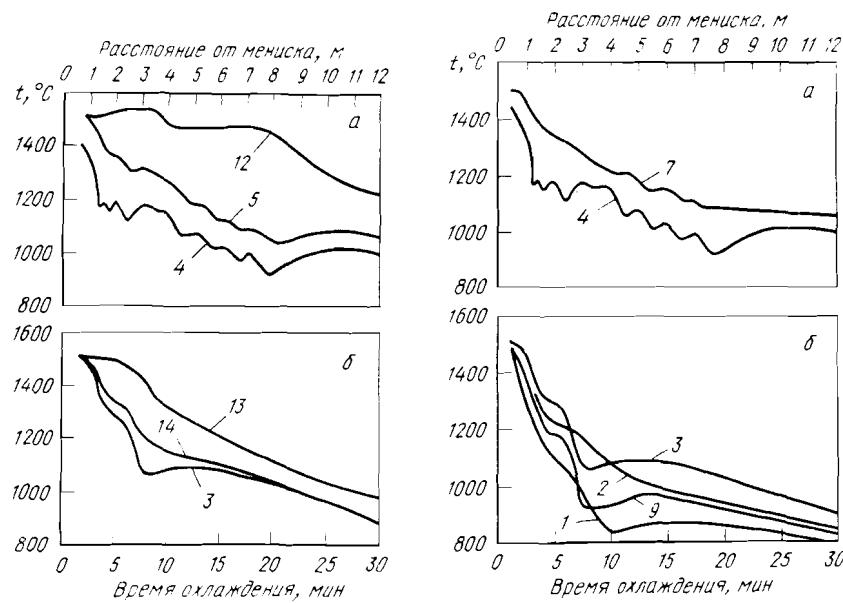


Рис. 24. Изменение температур подповерхностных точек на широкой грани слитка (а) и узкой грани (б)

Рис. 25. Изменение температур подповерхностных точек слитка на широкой грани (а) и у ребра слитка (б)

чивается до $40^\circ\text{C}/\text{мин}$, постепенно снижаясь затем до $10^\circ\text{C}/\text{мин}$ на тридцатой минуте. Максимальный перепад температур (550°C) между точками 12 и 4 наблюдается в момент окончания затвердевания. Характер охлаждения слитка в точках 8, 10, 11 аналогичен. По перегибу температурной кривой точки 12 в центре слитка можно определить время полного затвердевания слитка ($\tau_3 = 20$ мин) и глубину жидкой фазы при разливке со скоростью $0,43 \text{ м/мин}$ ($L_{\text{ж}} \approx 8,5 \text{ м}$).

Узкая грань в опыте охлаждалась в пределах секции 1 тремя последовательно расположеными по высоте слитка форсунками. Области орошения двух ближних к кристаллизатору форсунок перекрываются так, что образуют единое поле орошения. В связи с этим на кривых охлаждения в точках 3 и 14 видны только два участка резкого снижения температуры. Наиболее низкие температуры наблюдаются в точке 1 угловой части слитка (рис. 25 б). Изгибы кривой охлаждения этого участка располагаются несколько дальше подобных же изгибов на кривых охлаждения точек 3 и 9, испытывающих воздействие областей орошения форсунками узкой грани. После выхода из зоны орошения узкой грани в точках 1, 3, 9 наблюдается разогрев на $40 \div 70^\circ\text{C}$. Практически отсутствует разогрев на кривой охлаждения точки 2 вблизи угла со стороны широкой грани, так как этот участок поверхности слитка не охлаждается водой.

После выхода из ЗВО показания термопар 4, 7 на широкой грани близки. Это свидетельствует о выравнивании температуры поверхности слитка по его ширине. Темп охлаждения всех точек лежит в диапазоне $7 \div 10^\circ\text{C}/\text{мин}$. Результаты измерения температуры во внутренних точках слитка использовались для восстановления температуры поверхности металла в ЗВО.

На рис. 25, а приведены кривые охлаждения поверхности металла, полученные на основе данных измерений в точках 4 (между брусьями) и 7 (под бруском).

На рис. 26 показано изменение α на рассматриваемом участке поверхности слитка в ЗВО. "Пиковье" значения коэффициента теплоотдачи

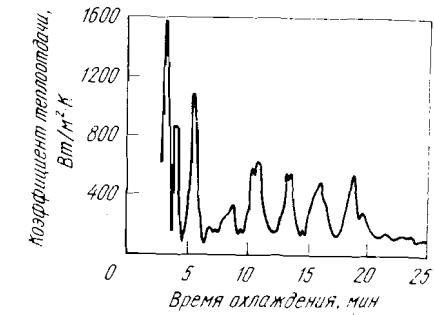


Рис. 26. Изменение коэффициента теплоотдачи в ЗВО

соответствуют центрам полей орошения форсунок, где плотность орошения максимальна.

Совместный анализ результатов измерения температуры поверхности слитка радиационными пирометрами и температуры во внутренних точках термопарами показал, что поверхность слитка испытывает циклические изменения температуры вследствие локального воздействия полей орошения форсунками. Экспериментальные данные говорят о значительном различии локальных условий охлаждения непрерывного слитка по периметру, что необходимо учитывать в расчетах и при отработке режимов охлаждения на действующих установках.

Экспериментами установлено, что поверхность слитка между брусьями испытывает циклические колебания температур в интервале $700 \div 1100^{\circ}\text{C}$, что создает возможность возникновения значительных термических напряжений и образования трещин.

В условиях НЛМК впервые были проведены эксперименты по измерению температурного поля во внутренних точках слитка на криволинейных машинах. Измерение температуры в непрерывном слитке в условиях криволинейных МНЛЗ имеет ряд особенностей, которые были учтены при подготовке экспериментов.

1. Увеличенная рабочая скорость разливки по сравнению с вертикальными МНЛЗ и соответственно большая глубина жидкой лунки и длина ЗВО.

2. Наличие радиального и криволинейного участков, накладывающее

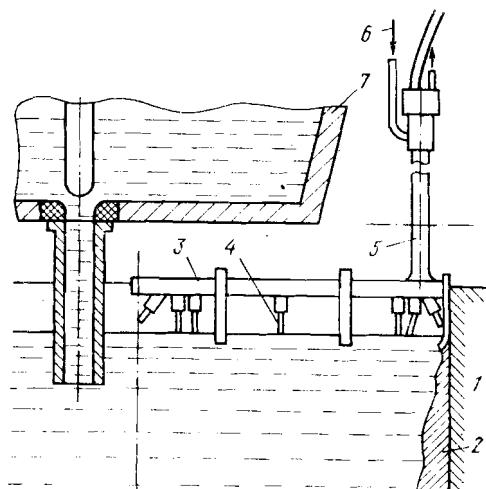


Рис. 27. Схема расположения блока термопар в кристаллизаторе:
1 – стена кристаллизатора; 2 – корочка слитка; 3 – блок термопар; 4 – термопара в чехле; 5 – штанга; 6 – воздух; 7 – промежуточный ковш

особые требования к выдаче конца слитка; защите термопар и соединительного кабеля и др. С учетом этого была усовершенствована методика проведения эксперимента и разработаны новые способы защиты термопар.

Для измерения температуры в поверхностных слоях слитка использовались малоинерционные термопары, заплавленные в кварц. Их рабочие спаи для измерения температуры во внутренних точках, расположенных в зоне действия вытекающей из разливочного стакана струи металла, были защищены корундовыми наконечниками диаметром 8 и 10 мм с толщиной стенки соответственно $0,3 \div 0,5$ мм и 2,0 мм.

В блоке для измерения температур было смонтировано 14 термопар в различных характерных точках слитка. Расположение блока термопар в кристаллизаторе показано на рис. 27. В первых двух экспериментах проводились измерения температур в непрерывных слитках со стороны малого радиуса r при разливке слябов сечением $0,25 \times 1,66 \text{ м}^2$ из стали ЗСП и сечением $0,25 \times 1,71 \text{ м}^2$ из стали 17Г1С.

На графиках рис. 28 приведены результаты измерений температур в нескольких точках сляба сечением $0,25 \times 1,71 \text{ м}^2$ из стали 17Г1С при скорости разливки 0,6 м/мин. Из графиков видно, что в центральной части слитка (точка 10) в течение 18 мин сохраняется примерно постоянная температура, близкая к температуре ликвидуса ($\sim 1500^{\circ}\text{C}$). Перегиб температурной кривой 10 происходит в момент окончания затвердевания слитка в его центральной части. Время затвердевания слитка, определенное по пересечению температурной кривой 10 с равновесной темпера-

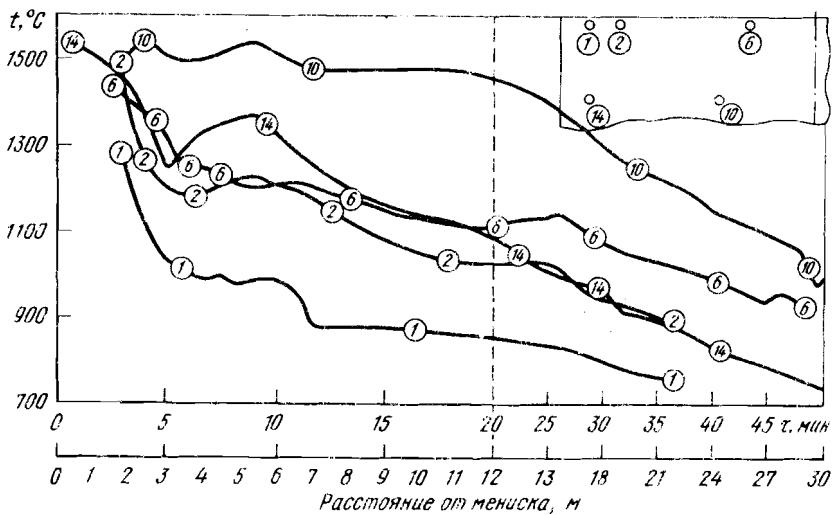


Рис. 28. Изменение температур в сечении криволинейного слитка (цифры – номера термопар)

турой солидуса, составляет $\sim 22,5$ мин, а протяженность жидкой фазы – $13,5$ м. Во всех опытах самую низкую температуру показывала термопара 1, расположенная в углу слитка.

Температура в середине узкой грани (термопара 14) резко снижается при прохождении кристаллизатора, зоны подбоя и секции 1 до значения 1250°C в конце первой секции. При выходе из 1-ой секции после прекращения водяного охлаждения наблюдается повышение температуры до 1370°C . Колебания температур в точке 2, видимо, характеризуют неравномерность охлаждения на отдельных участках.

Термопарами 1, 2, 6 зафиксирован разогрев поверхности на $50 \div 100^{\circ}\text{C}$ в пределах 1, 2 и 3 секций, вызванный резким изменением плотности орошения в этих секциях. Прекращение форсуночного охлаждения на отметке $11,5$ м вызывает незначительный разогрев поверхностных слоев (точка 6) за счет наличия жидкой фазы в центральных частях слитка.

В целом температура поверхностных слоев широкой грани слитка перед зоной разгиба поддерживается на уровне 1100°C , узкой грани $\sim 1000^{\circ}\text{C}$, а угла – 850°C .

В дальнейших сериях экспериментов была разработана новая конструкция блока термопар, которая позволила впервые провести измерения температуры поверхностных слоев одновременно по большому R и малому r радиусам криволинейного слитка.

На рис. 29 показан блок термопар (а) и схема расположения термопар в сечении слитка (б).

В результате экспериментов были определены значения температур в 8 точках сечения слитка по длине ЗВО и получены графики их изменения по сечению при охлаждении слитка на складе слябов в штабеле.

Исследования проводились при отливке слябов сечением $0,25 \times 1,29 \text{ м}^2$ из стали 0,8Ю при скорости вытягивания $0,6 \text{ м/мин}$. Результаты измерения температур приведены на рис. 30 и 31.

Из рис. 30 следует, что после выхода слитка из кристаллизатора наблюдается монотонное снижение температуры поверхностных слоев

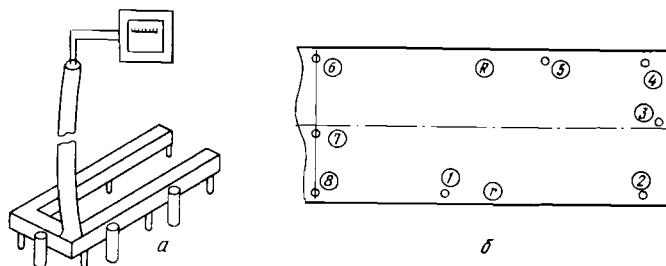


Рис. 29. Схема блока (а) и расположение термопар в сечении (б) для криволинейной МНЛЗ

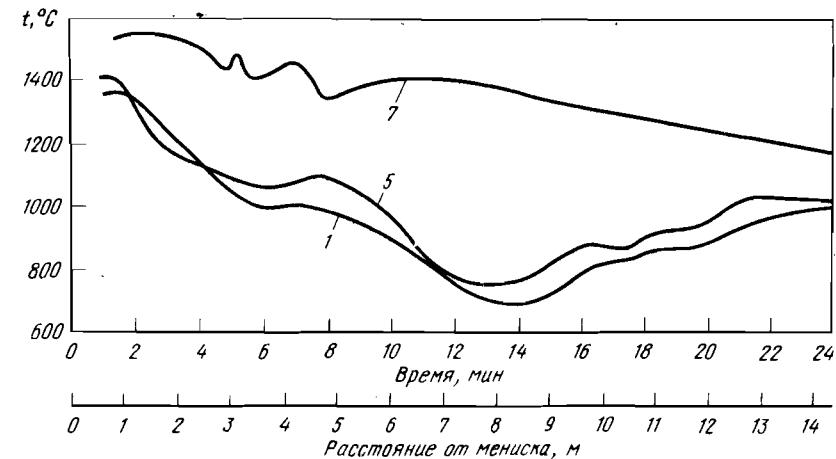


Рис. 30. Изменение температур в сечении криволинейного слитка (цифры у кривых – номера термопар)

(точки 1 и 5), темп охлаждения составляет $60 \div 90^{\circ}\text{C}/\text{мин}$. На участке 3-й секции происходит разогрев поверхностных слоев, что связано с неравномерностью форсуночного охлаждения. Более высокий уровень температур в точке 5 по сравнению с 1 объясняется различной глубиной их залегания. Резкое снижение температур происходит в конце 4-й секции и начале 5-й, где температура в точке 5 снижается до уровня 750°C ,

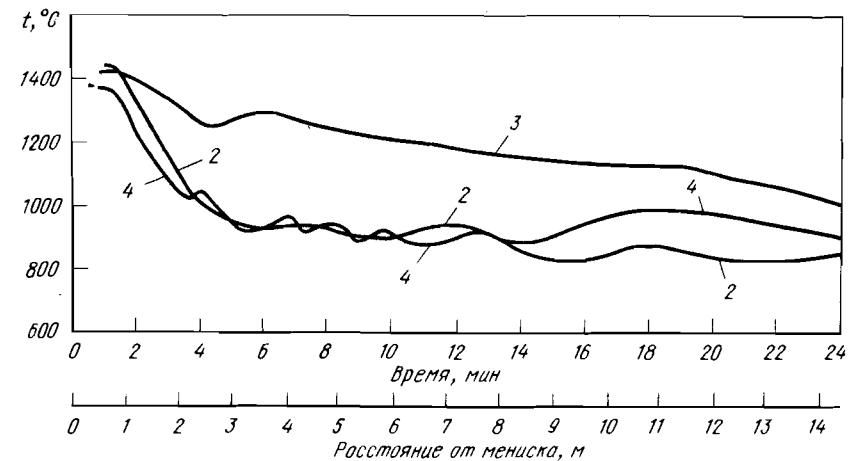


Рис. 31. Изменение температур в сечении криволинейного слитка

а в точке 1 – до 690°C. Это связано с тем, что термопары 1 и 5 находились в зоне воздействия факелов форсунок с максимальной плотностью орошения. Сравнительно низкий уровень температуры в точке 7, по-видимому, объясняется тем, что в районе рабочего спая термопары, защищенной огнеупорной обмазкой, произошло местное образование твердой фазы металла. Графики изменения температур в угловых точках 2 и 4 (рис. 31) характеризуются незначительной неравномерностью по длине ЗВО. Для кривой охлаждения точки 3 по середине узкой грани характерен высокий уровень температур. Прекращение форсуночного охлаждения узкой грани в начале 2-й секции вызывает незначительный разогрев поверхностных слоев (с 1250 до 1300°C).

Сравнение температур в поверхностных слоях по большому и малому радиусу свидетельствует об одинаковом характере охлаждения. Более высокие температуры по большому радиусу в первых секциях объясняются отчасти более глубоким залеганием термопар, а также недостаточным охлаждением широкой грани большого радиуса в 1-й секции.

С середины 4-й секции температура становится выше примерно на 100°C уже на стороне малого радиуса, что объясняется меньшими расходами воды по малому радиусу примерно на 20÷35 %. Даже большая удаленность термопары 6 от поверхности слитка по большому радиусу не компенсирует влияния более высокой интенсивности охлаждения.

Различие температур противоположных граней криволинейного слитка может привести к возникновению растягивающих внутренних напряжений, которые в значительной степени обуславливают образование дефектов металла. В связи с этим на основании результатов экспериментов для выравнивания температур по сторонам большого и малого радиусов была проведена корректировка расходов воды в 4 и 5 секциях.

Измерения температур на складе слябов показали, что слябы поступают на склад при температуре поверхности слоев 600÷800°C. В первые 8–9 ч темп охлаждения сляба в штабеле составляет ~0,5–0,7°C/мин, в дальнейшем он замедляется. Примерно через 20 ч среднемассовая температура сляба составляет ~320°C.

Таким образом, на основе полученных экспериментальных данных можно проводить анализ процесса охлаждения слитка в различных зонах МНЛЗ, а также оценивать темп охлаждения слябов за пределами машины. Приведенные результаты могут быть использованы для отладки режимов, а также при проектировании новых МНЛЗ.

§ 4. МЕТОДИКА ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА ЗВО

Основными задачами теплового расчета вторичного охлаждения МНЛЗ являются расчет расхода охлаждающей воды на каждую секцию ЗВО и определение числа форсунок в секции. В данной методике наряду

с известными положениями приведены результаты исследований, проведенных в Липецком политехническом институте.*

В инженерных расчетах толщину затвердевающей корочки слитка часто определяют по закону квадратного корня, который удовлетворительно согласуется с многочисленными экспериментальными данными, полученными для различных режимов охлаждения, и может быть использован для инженерных расчетов. Отклонение от условия $t_{\text{н}} = \text{const}$ учитывается с помощью k_3 . Если в качестве начала отсчета принять момент выхода слитка из кристаллизатора, то формулу закона квадратного корня можно записать в виде:

$$\xi = \xi_{\text{кр}} + k_3 \sqrt{\tau}, \quad (23)$$

где ξ – толщина корочки слитка в ЗВО, м; $\xi_{\text{кр}}$ – толщина корочки на выходе из кристаллизатора, м; τ – время от момента выхода слитка из кристаллизатора, с; k_3 – коэффициент затвердевания, $\text{м} \cdot \text{с}^{-0,5}$.

На выходе из кристаллизатора по условиям прочности должна обеспечиваться толщина корочки не менее $\xi = 25 \div 30$ мм. По опытным данным для разных слитков на выходе из кристаллизатора $\xi_{\text{кр}} = (0,25 \div 0,35)a$, где a – половина толщины слитка, м.

Для условий ЗВО по опытным данным $k_3 = 0,0023 \div 0,0027$, $\text{м} \cdot \text{с}^{-0,5}$.

Среднеинтегральную толщину корочки ξ в данной зоне охлаждения можно рассчитать, используя закон квадратного корня в формуле (23):

$$\xi = \frac{1}{(\tau_2 - \tau_1)} \int_{\tau_1}^{\tau_2} \xi(\tau) d\tau = \xi_{\text{кр}} + \frac{k_3}{\tau_2 - \tau_1} \frac{2}{3} (\tau_2^{3/2} - \tau_1^{3/2}), \quad (24)$$

где τ_1 – время входа слитка в данную секцию, с; τ_2 – время выхода из секции, с.

По результатам проведенных исследований получена зависимость α от времени, прошедшего с момента выхода слитка из кристаллизатора.

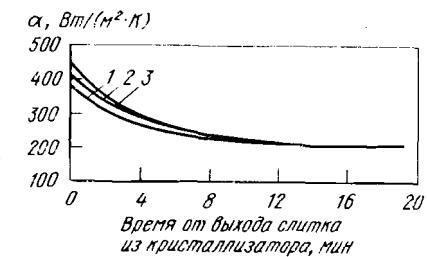


Рис. 32. Зависимость коэффициента теплоотдачи от времени сталей:
1 – низколегированных; 2 – углеродистых; 3 – для производства автолиста

*Методика составлена О. Н. Ермаковым.

Эта зависимость, представленная на рис. 32, получена в соответствии с основными требованиями оптимального режима для различных групп марок стали. Она может быть рекомендована для приближенных расчетов вторичного охлаждения МНЛЗ. Величина α может быть определена на основе экспериментальных данных по графикам рис. 32.

Зависимость α от плотности орошения представляется в виде:

$$\alpha = Bg_F + \alpha_0, \quad (25)$$

где g_F — плотность орошения поверхности слитка, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$; α_0 — начальное значение коэффициента теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; B — опытный коэффициент, $(\text{Вт} \cdot \text{с})/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$.

По опытным данным величины коэффициентов изменяются в пределах: $B = 34 \div 40 (\text{Вт} \cdot \text{ч})/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ для МНЛЗ с изогнутой технологической осью; $B = 60 \div 100 (\text{Вт} \cdot \text{ч})/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ для вертикальных МНЛЗ; $\alpha_0 = 120 \div 160 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Значительное влияние на теплоотдачу непрерывного слитка в зоне вторичного охлаждения оказывает поддерживающая система. Конструктивные элементы этой системы определяют гидродинамическую и тепловую картину на поверхности слитка. В наибольшей степени этот фактор проявляется в условиях МНЛЗ с изогнутой технологической осью. Поддерживающая система закрывает часть слитка, т.е. играет роль экрана, в результате чего не вся охлаждающая вода достигает поверхности слитка. Для изучения особенностей охлаждения с учетом влияния поддерживающей системы в Липецком политехническом институте проводились исследования на специальном стенде, моделирующем участок охлаждения, расположенный между двумя соседними роликами зоны вторичного охлаждения криволинейной МНЛЗ. Результаты исследований, обработанные О. Н. Ермаковым, представлены на рис. 33 в виде графиков зависимости коэффициента использования воды от степени экранирования.

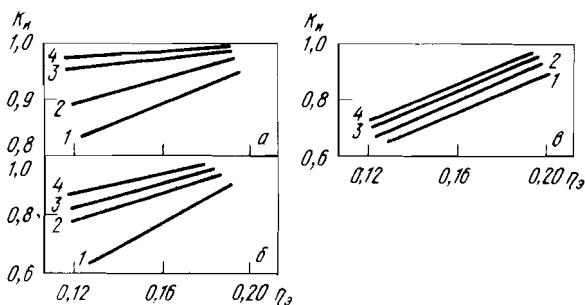


Рис. 33. Зависимость коэффициента использования воды от степени экранирования при расстояниях от форсунки до поверхности, м: а — 0,3; б — 0,4; в — 0,5 и давлении перед форсункой, МПа: 1 — 0,1; 2 — 0,2; 3 — 0,3; 4 — 0,4

Коэффициент использования воды (K_u) представляет собой отношение количества воды, достигающей поверхности охлаждения при наличии роликов и без них. Степень экранирования (η_s) определяется как отношение зазора между бочками роликов к диаметру ролика. Графики получены для разных значений расстояния между форсункой и поверхностью охлаждения, а также давления воды перед форсункой. Расход воды на зону охлаждения с учетом K_u определяется как

$$G = (g_F F_{op}) / K_u, \quad (26)$$

где G — расход воды на зону, $\text{м}^3/\text{с}$; g_F — плотность орошения, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$; F_{op} — площадь поверхности орошения, м^2 .

Для определения поверхности орошения вводят понятие степени орошения φ , которая характеризует собой отношение орошаемой поверхности (F_{op}) к общей поверхности зоны охлаждения (F):

$$\varphi = F_{op}/F. \quad (27)$$

Коэффициент φ при известной длине зоны охлаждения l определяют как отношение средней ширины жидкой лунки b_x в зоне охлаждения к ширине слитка b (см. рис. 34):

$$\varphi = b_x/b = [b - (2\xi)]/b, \quad (28)$$

где ξ — средняя толщина корочки в зоне охлаждения, м.

Для разбрызгивания охлаждающей воды на практике применяют два вида форсунок: плоскофакельные и круглофакельные. Расход воды через форсунку или ее пропускная способность (g_Φ) связана с давлением воды перед форсункой p зависимостью вида:

$$g_\Phi = a_0 \sqrt{p}, \quad (29)$$

где a_0 — постоянный коэффициент, зависящий от типа форсунки, $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{МПа}^{0,5})$.

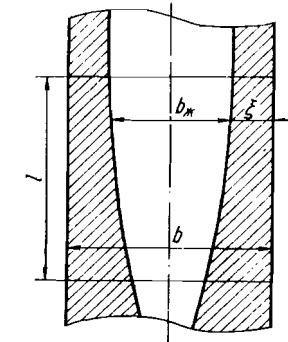


Рис. 34. Схема роста корочки

Соотношение (29) называют расходной характеристикой форсунки, g_0 – расходным коэффициентом. Рабочий диапазон изменения давления составляет $0,05 \div 0,6$ мПа. Нижний предел давления воды ограничен условием устойчивости работы форсунки, а верхний – максимальной пропускной способностью.

Для форсунок вводят понятие так называемого эффективного угла раскрытия факела ($\beta_{\text{эфф}}$), который ограничивает зону действия струй воды, подаваемой форсункой.

Для плоскофакельных форсунок, как правило, $\beta_{\text{эфф}} = 100 \div 110^\circ$. Схема расположения форсунок в зоне охлаждения обусловлена конструкцией секции роликовой поддерживающей системы. Поэтому число горизонтальных рядов форсунок (M) обычно выбирается равным числу межроликовых промежутков в данной секции.

Число форсунок (N_1) в одном горизонтальном ряду зависит от средней ширины орошаемой поверхности данной зоны охлаждения и определяется из условия, когда факелы форсунок охватывают всю необходимую ширину зоны орошения.

Для верхних секций ЗВО, которым соответствует большая ширина зоны охлаждения, на практике применяют установку 2-х или 3-х форсунок в одном горизонтальном ряду. В нижних секциях ЗВО бывает достаточно установка одной форсунки в каждом ряду. Общее число форсунок (N) в секции охлаждения ЗВО кратно числу межроликовых промежутков:

$$N = N_1 M. \quad (30)$$

С другой стороны, N связано через пропускную способность форсунки с расходом воды на зону охлаждения:

$$G = g_{\Phi} N. \quad (31)$$

Задав N_1 и $\beta_{\text{эфф}}$, зная ширину слитка b и ξ , можно определить расстояние h от поверхности слитка до форсунки по формуле:

$$h = \frac{b - 2\xi}{2N_1 \operatorname{tg}(\beta_{\text{эфф}}/2)}. \quad (32)$$

Это соотношение справедливо при том условии, что факелы форсунок не накладываются друг на друга. Для обеспечения монотонного характера изменения температуры поверхности слитка при переходе от одной секции к другой необходимо, чтобы расходы воды через форсунку отличались бы не более, чем на $20 \div 30\%$, т.е.

$$\frac{g_{\Phi i} - g_{\Phi(i-1)}}{g_{\Phi i}} \leq (0,2 \div 0,3), \quad (33)$$

где i и $(i-1)$ – соответственно порядковые номера данной секции и предыдущей.

Несоблюдение этого условия может привести к неравномерности температуры поверхности слитка, возникновению значительных термических напряжений в корочке и образованию трещин, поэтому при переходе к расчетам следующей зоны охлаждения необходимо сравнить расходы воды через форсунку по условию (33).

В вертикальных МНЛЗ расход воды на секцию ЗВО по обеим сторонам слитка одинаков. Для секций криволинейных и радиальных МНЛЗ, угол наклона которых к горизонту $< 80^\circ$, рекомендуется на сторону R подавать на 20% воды больше, чем на сторону r . В этих случаях определяется сначала расход воды на секцию по стороне большого радиуса G_R , а затем рассчитывается расход на сторону малого радиуса:

$$G_r = 0,8G_R. \quad (34)$$

Таким образом, на основании изложенного можно составить алгоритм расчета G_i на каждую i -тую зону охлаждения и подбора и расстановки разбрызгивающих устройств по секциям ЗВО. Для расчета задаются скорость разливки (v) и геометрические размеры элементов каждой зоны охлаждения. Расчет можно разделить на несколько этапов.

Предварительно в соответствии с заданной конструкцией роликовой поддерживающей системы определяется η_3 в каждой зоне охлаждения.

1. По заданным v и длинам зон охлаждения (l_i) определяются время входа слитка в зону охлаждения (τ_1) и время выхода из нее: $\tau_2 = l_i/v$, где $i = 1 \div n_3$ – порядковый номер зоны; n – число зон охлаждения.

Из рис. 32 можно определить значения α_1 и α_2 в моменты времени τ_1 и τ_2 в соответствии с требуемым для данной марки стали режимом охлаждения. Предполагая изменение в зоне квазилинейным, находят средний коэффициент теплоотдачи для данной зоны:

$$\bar{\alpha} = (\alpha_1 + \alpha_2)/2.$$

Определив по закону квадратного корня толщину корочки на выходе из кристаллизатора (ξ_{kp}), рассчитывают ξ в данной зоне охлаждения по соотношению (24).

Из соотношения (28) по найденному значению ξ определяют φ , а из формулы (27) находят величину F_{op} .

Из формулы (25) с учетом найденного ранее $\bar{\alpha}$ находят среднеинтегральную плотность орошения в зоне g_F .

2. Предполагая, что вся охлаждающая вода, подаваемая форсунками, достигает поверхности слитка, т.е. $K_u = 1$, из соотношения (26) находят расход воды на зону охлаждения G .

Зная из конструкции роликовой поддерживающей системы M , задавая N_1 , по формуле (30) определяют общее число форсунок в зоне охлаждения.

дения N . Из формулы (31) определяют расход воды через форсунку (g_F). По известному значению g_F из соотношения (29) находят давление воды перед форсункой (p) и далее по формуле (32) находят расстояние h от поверхности слитка до форсунки.

3. После этого по диаграммам рис. 33 уточняют K_H , расход воды на зону охлаждения G , расход воды через форсунку g_F и давление воды p .

Для криволинейных и радиальных МНЛЗ общий расход воды на зону определяется на стороне большого радиуса G_R , а затем по формуле (34) определяется расход воды в зоне на стороне малого радиуса G_r . После этого для стороны малого радиуса уточняются значения расхода на форсунку g_F , и давление воды p . Расчет заканчивают составлением таблицы.

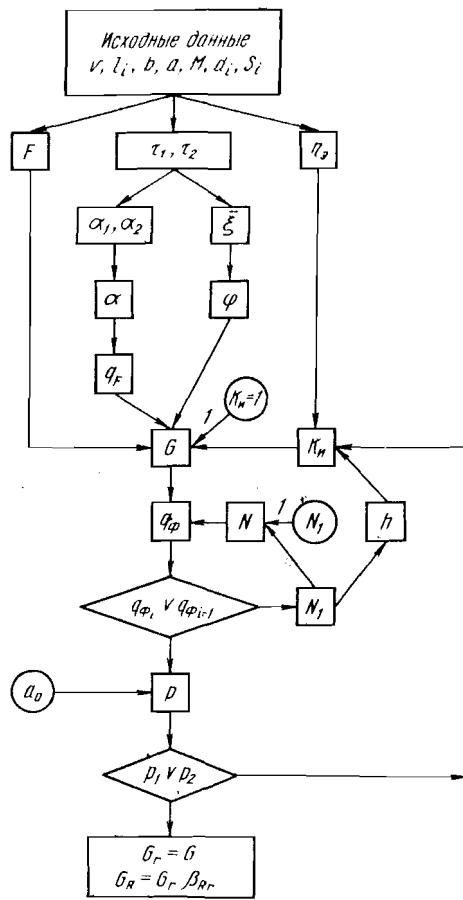


Рис. 35. Схема алгоритма расчета ЗВО

На рис. 35 представлена схема алгоритма проектировочного расчета. На основании представленного алгоритма можно составить программу расчета на ЭЦВМ.

Пример расчета ЗВО

Техническое задание: рассчитать вторичное охлаждение радиальной МНЛЗ при $R = 12$ м для разливки стали ЗСП в слитки сечением $(0,25 \times 1,55)$ м²; $v = 0,6$ м/мин. Зона вторичного охлаждения разделена на 5 секций. Заданы основные размеры конструктивных элементов для каждой секции ЗВО, на основании которых определена степень экранирования. Конструктивные данные по секциям роликовой поддерживающей системы приведены ниже.

Секция	1	2	3	4	5
M	6	4	4	10	10
l_i , м	0,97	1,03	1,03	3,0	3,8
d_i , м	0,14	0,21	0,21	0,25	0,31
S_i , м	0,029	0,050	0,050	0,050	0,065
η_3	0,21	0,24	0,24	0,20	0,21

Для охлаждения широких слабов используются широкоугольные плоскофакельные форсунки с углом раскрытия $\beta_{\text{зФ}} = 100^\circ$ и расходными коэффициентами $a_0 = (3,7; 5,9; 9,3; 14,9) \cdot 10^{-4}$ м³/(с · мPa^{0,5}).

Для данной конструкции роликовой поддерживающей системы положение верхних трех секций можно считать вертикальными, а с четвертой секции начинается искривленный участок.

1 этап расчета. В каждой зоне охлаждения определяем $\bar{\alpha}$, g_F , φ и $F_{\text{оп}}$. По опытным данным предварительно задаем: толщину корочки на выходе из кристаллизатора $\xi_{kp} = 0,3a = 0,3 \cdot 0,125 = 0,375$ м; коэффициент затвердевания в формуле (23) $k_3 = 0,0025$ м · с^{-0,5}; коэффициенты в формуле (25) $B = 40$ (Вт · ч)/(м³ · К); $\alpha_0 = 160$ Вт/(м² · К).

Расчеты проводим в указанной ранее последовательности, результаты расчетов представлены ниже.

Зона охлаждения	1	2	3	4	5
τ_1 , мин	0	1,6	3,33	5,05	10,05
τ_2 , мин	1,6	3,33	5,05	10,05	16,4
α_1 , Вт/(м ² · К)	370	330	270	250	220
α_2 , Вт/(м ² · К)	330	270	250	220	210
α , Вт/(м ² · К)	350	300	260	235	215
ξ , м	0,062	0,073	0,081	0,099	0,116
ξ , м	0,053	0,067	0,077	0,09	0,108
φ	0,93	0,91	0,90	0,88	0,86
$F_{\text{оп}}$, м ²	1,40	1,46	1,44	4,11	5,07
g_F , м ³ /(м ² · ч)	4,75	3,5	2,5	1,875	1,375

Далее расчеты проводятся последовательно для каждой зоны (2 и 3 этапы).

1 зона охлаждения. При $K_u = 1$ расход воды на зону

$$G = (F_{op}g_F)/K_u = (1,4 \cdot 4,75)/1,0 = 6,65 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Число межроликовых промежутков в первой секции $M = 6$. Предусматриваем установку двух форсунок в ряд, т.е. $N_1 = 2$, тогда общее число форсунок в зоне $N = N_1 M = 6 \cdot 2 = 12$; расход воды на одну форсунку $g_\phi = G/N = 6,65/12 = 0,55 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Используем форсунки с расходным коэффициентом $a_0 = 3,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{мPa}^{0,5}) = 1,33 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{мPa}^{0,5})$, тогда $p = (g_\phi/a_0)^2 = (0,55/1,33)^2 = 0,17 \text{ мPa}$.

По формуле (32) рассчитываем расстояние от поверхности слитка до форсунки:

$$h = \frac{b - (2\xi)}{2N, \tan(\beta_{\phi}/2)} = \frac{1,55 - 0,124}{2 \cdot 2 \cdot \tan(100/2)} = 0,3 \text{ м.}$$

Далее уточняем коэффициент использования воды. При $h = 0,3 \text{ м}$, $p = 0,17 \text{ мPa}$, $\eta_g = 0,21$ по диаграммам рис. 33 получим $K_u = 0,96$.

Уточняем расход воды на зону:

$$G = (F_{op}g_F)/K_u = (1,4 \cdot 4,75)/0,96 = 6,9 \text{ м}^3/\text{ч};$$

расход воды на одну форсунку

$$g_\phi = G/N = 6,9/12 = 0,58 \text{ м}^3/\text{ч};$$

и давление воды перед форсункой

$$p = (g_\phi/a_0)^2 = (0,58/1,33)^2 = 0,19 \text{ мPa}.$$

Поскольку расходы воды по сторонам большого и малого радиусов по условиям задания для первой зоны охлаждения одинаковы, то расчет можно считать законченным.

2 зона охлаждения. При $K_u = 1$

$$G = (1,46 \cdot 3,5)/1,0 = 5,1 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

При установке двух форсунок в ряд ($N_1 = 2$) и для $M = 4$ $N = 2 \cdot 4 = 8$; $g_\phi = 5,1/8 = 0,64 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Сравним расходы воды на одну форсунку для первой и второй зон $|g_{\phi 2} - g_{\phi 1}|/g_{\phi 2} = (0,64 - 0,55)/0,64 = 0,14$, что удовлетворяет условию (33).

Используем форсунки с тем же расходным коэффициентом, что

и для первой зоны, тогда $p = (0,64/1,33)^2 = 0,23 \text{ мPa}$; $h = 1,55 - 0,146/[2 \cdot 2 \tan(100/2)] = 0,295 \text{ м}$; принимаем $h = 0,3 \text{ м}$.

При уточнении по диаграммам получен $K_u = 1$, следовательно, расчет второй зоны охлаждения закончен.

3 зона охлаждения. При $K_u = 1$

$$G = (1,44 \cdot 2,5)/1,0 = 3,6 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Принимаем установку двух форсунок в ряд ($N_1 = 2$), тогда при $M = 4$ $N = 2 \cdot 4 = 8$; $g_\phi = 3,6/8 = 0,45 \text{ м}^3/\text{ч}$.

$$|g_{\phi 3} - g_{\phi 2}|/g_{\phi 3} = |0,45 - 0,64|/0,45 = 0,42 > 0,3,$$

что превышает условие (33).

Следовательно, в данной секции более целесообразно поставить по одной форсунке в ряду или выбрать форсунки с другой характеристикой.

Примем $N_1 = 1$ тогда $N = 4$; $g_\phi = 3,6/4 = 0,9 \text{ м}^3/\text{ч}$. Изменение расхода $|g_{\phi 3} - g_{\phi 2}|/g_{\phi 3} = (0,9 - 0,64)/0,9 = 0,29$, т.е. условие (33) выполняется.

Используем форсунки с расходным коэффициентом $a_0 = 5,3 \times 10^{-4} \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{мPa}^{0,5}) = 2,12 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{мPa}^{0,5})$, тогда $p = (0,9/2,12)^2 = 0,18 \text{ мPa}$; $h = (1,55 - 0,162)/2 \cdot 1 \cdot \tan 50 = 0,575 \text{ м}$.

Принимаем расстояние $h = 0,6 \text{ м}$. Уточнение по графикам дает $K_u = 1$, поэтому расчет заканчиваем.

4 зона охлаждения. Криволинейный участок. При $K_u = 1$ рассчитываем расходы воды и давление на стороне большого радиуса R :

$$G_R = (1,875 \cdot 4,11)/1,0 = 7,7 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

$M = 10$, принимаем $N_1 = 1$, следовательно, $N = 10$, тогда $g_{\phi R} = 7,7/10 = 0,77 \text{ м}^3/\text{ч}$.

$$|g_{\phi 4} - g_{\phi 3}|/g_{\phi 4} = |0,77 - 0,9|/0,77 = 0,17, \text{ т.е. условие (33) удовлетворяется.}$$

Используем такие же форсунки, как для 3-й зоны, тогда $p_R = (0,77/2,12)^2 = 0,13 \text{ мPa}$.

Расстояние от форсунки до поверхности слитка такое же, как и в предыдущей зоне ($h = 0,6 \text{ м}$).

Уточняем коэффициент использования воды. При степени экранирования в 4-ой зоне $\eta_g = 0,20$ из графиков рис. 33, $K_u = 0,9$. Уточняем расходы и давление:

$$G_R = (1,875 \cdot 4,11)/0,9 = 8,6 \text{ м}^3/\text{ч}; g_{\phi R} = 8,6/10 = 0,86 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$p_R = (0,86/2,12)^2 = 0,16 \text{ мPa}.$$

На стороне малого радиуса r расход воды на зону по уравнению (34):

$$G_r = 0,8 G_R = 0,8 \cdot 8,6 = 6,9 \text{ м}^3/\text{ч}; g_{fr} = 6,9/10 = 0,69 \text{ м}^3/\text{ч}; p_r = (0,69/2,12)^2 = 0,11 \text{ мПа}.$$

В 5-ой зоне охлаждения расчет проводится аналогично 4-й зоне. Результаты расчета зоны вторичного охлаждения приведены ниже.

Зона охлаждения	1	2	3	4	5
$G_R, \text{м}^3/\text{ч}$	6,9	5,1	3,6	8,6	7,8
$G_r, \text{м}^3/\text{ч}$	6,9	5,1	3,6	6,9	6,2
N_1	2	2	1	1	1
N	12	8	4	10	10
$g_{fr}, \text{м}^3/\text{ч}$	0,55	0,64	0,9	0,86	0,78
$g_{fr}, \text{м}^3/\text{ч}$	0,55	0,64	0,9	0,69	0,62
$a_0 \cdot 10^4, \text{м}^3/(\text{с} \times \text{мPa}^{0,5})$	3,7	3,7	5,3	5,3	5,3
$p_R, \text{мPa}$	0,17	0,23	0,18	0,16	0,11
$p_r, \text{мPa}$	0,17	0,23	0,18	0,11	0,09
$h, \text{м}$	0,3	0,3	0,6	0,6	0,6

Таким образом, в результате проведенных расчетов определены расходы воды и схемы расстановки форсунок в каждой секции ЗВО.

Изменение температуры поверхности слитка в пределах ЗВО можно определить приближенно по методике, изложенной в книге А. А. Скворцова и А. Д. Акименко, или более точно рассчитать на основе метода математического моделирования процесса затвердевания с применением ЭВМ, который излагается далее.

Глава 5. ЗАТВЕРДЕВАНИЕ НЕПРЕРЫВНЫХ СЛИТКОВ

§ 1. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ МЕТАЛЛОВ

Затвердевание металлов или сплавов – это процесс перехода из жидкого состояния в твердое, проходящий за счет охлаждения, т.е. отвода тепла от формирующегося слитка.

Процесс затвердевания тесно связан с тепловыми процессами, которые, в свою очередь, определяют важнейшие технологические и конструктивные параметры непрерывного литья стали: скорость разливки, режимы охлаждения непрерывного слитка, конструкции кристаллизатора и зоны вторичного охлаждения, общие габариты МНЛЗ и т.д.

Формирование непрерывного слитка является сложным необратимым процессом, состоящим из целого ряда различных явлений, взаимодействующих друг с другом. Необратимость связана с переносом тепла и

массы, с внутренним движением в твердой и жидкой фазе. Формирующийся слиток можно считать гетерогенной системой, для которой в общем случае характерно наличие двух фаз – жидкой и твердой, разделенных переходной двухфазной зоной.

Процесс кристаллизации стального слитка протекает в условиях сложного наложения процессов конвективного перемещения жидкого металла, роста кристаллов и других физико-химических явлений. Структура слитка определяется взаимным действием всех этих сложных факторов. Существенное влияние на ход теплофизических процессов кристаллизации оказывает гидродинамика расплава.

При непрерывной разливке стали в затвердевающем слитке происходит вынужденное движение в жидкой фазе при воздействии струи металла, поступающего в кристаллизатор из промежуточного ковша через разливочный стакан. Далее энергия этой струи постепенно уменьшается в соответствии с законами ее распространения, после чего решающее значение приобретает естественная конвекция жидкого расплава. На определенной стадии затвердевания вследствие растущей вязкости расплава естественная конвекция также прекращается, и в нижней части заготовки осевая зона затвердевает в условиях застоя расплава.

В двухфазной зоне в жидком расплаве имеются растущие кристаллы – это зона кристаллизации. Здесь протекают взаимосвязанные процессы тепло-массопереноса, вязкого течения расплава и другие в условиях неоднородности поля температур и давлений. Эти сложные физико-химические процессы в конечном счете определяют качество непрерывных слитков.

В твердой фазе происходит перенос энергии к внешней границе слитка, процессы упругой деформации, вязкого и пластического течения среды. Здесь также действуют силы тяжести и трения в кристаллизаторе.

Математическая модель кристаллизации непрерывного слитка рассматривается как результат протекающих одновременно тепловых, диффузионных и гидродинамических явлений. При фундаментальном теоретическом подходе требуется анализ всего комплекса явлений, происходящих в слитке – термодинамических, гидродинамических, диффузионных, тепловых. Однако при этом система уравнений получается сложной и трудно применимой для практических инженерных расчетов.

На практике используют упрощенный вариант этой модели для анализа исследования теплового режима формирования непрерывного слитка, что вполне оправдано в связи с характерными особенностями рассматриваемых процессов. Формирование слитка обусловлено совместным протеканием процессов затвердевания и кристаллизации, которые являются двумя неразрывными сторонами сложного процесса перехода металла из жидкого состояния в твердое.

Кристаллизацией называется процесс формирования структуры

металла с учетом всех сопровождающих его явлений. Под затвердеванием понимают процессы теплопереноса в условиях фазового превращения. В любой момент затвердевание и кристаллизация характеризуются одной и той же скоростью протекания, но роль их в процессе перехода из жидкого в твердое состояние неодинакова. Процесс кристаллизации связан с условиями возникновения и роста кристаллических зародышей, а процесс затвердевания, связанный прежде всего с теплоотводом, определяет окончательное формирование твердой фазы слитка.

Таким образом, теплоперенос в условиях фазового превращения определяет обе стороны процесса перехода металла из жидкого в твердое состояние. Термовые условия в слитке (в частности, температурное поле слитка) являются главными факторами.

Процесс затвердевания непрерывного слитка, связанный с теплоотводом, определяется теплофизическими свойствами металла: теплопроводностью (λ_M), теплоемкостью (C_M) и скрытой теплотой кристаллизации (или теплотой фазового превращения) (q_{kp}). Скрытая теплота кристаллизации физически соответствует энергии, которую необходимо отвести от металла при переходе от неупорядоченной структуры жидкости к упорядоченной кристаллической структуре твердой фазы. При этом энергия тепловых колебаний атомов не изменяется, что и соответствует постоянству температуры при этом переходе.

Затвердевание сплавов, к которым относится сплав железа с углеродом, проходит в интервале температур ликвидуса (t_L) и солидуса (t_c). Эти температуры для равновесного состояния определяются диаграммой состояния сплавов железо – углерод.

Скрытая теплота кристаллизации сталей выделяется в пределах двухфазной зоны в интервале ($t_L - t_c$). Численная величина q_{kp} зависит от природы сплава и его химического состава. В общем для сталей q_{kp} изменяется в пределах $240 \div 360$ кДж/кг, а для большинства сталей, разливаемых непрерывным способом, она может характеризоваться средним значением, т.е. $q_{kp} = 270$ кДж/кг.

Стремление интенсифицировать процесс непрерывной разливки стали наталкивается на трудности, связанные с ограничением скорости затвердевания.

На основании опытов некоторыми авторами установлено, что при непрерывной разливке стали в течение первых 5 с затвердевание идет при максимальном отводе тепла. Плотность теплового потока изменяется от 4,5 до $1,16$ мВт/м², а скорость затвердевания изменяется в пределах от $120 \div 200$ до 50 мм/мин.

По данным В. Т. Сладкоштева и др. в условиях криволинейных МНЛЗ максимальная скорость кристаллизации составляет $1,0 \div 1,1$ мм/с (или $60 \div 66$ мм/мин).

В начальный период разливки средняя скорость затвердевания в кристаллизаторе при увеличении толщины слитка не изменяется. Существен-

ное влияние на скорость затвердевания оказывают соотношения поверхности, объема заготовки и сторон. Для углеродистых сталей на выходе из кристаллизатора скорость затвердевания изменяется в пределах $15 \div 22$ мм/мин.

По данным М. С. Бойченко и В. С. Рутеса в зоне вторичного охлаждения основную долю в теплоотводе составляет тепло, отводимое от твердой корки слитка. Скорость затвердевания не зависит или мало зависит от интенсивности охлаждения, а зависит, в основном, от толщины слитка. Величины скорости затвердевания для слитков разной толщины изменяются от $7 \div 12$ до $12 \div 16$ мм/мин; средняя скорость кристаллизации для круглых слитков составляет $9 \div 10$ мм/мин.

В работе В. Т. Сладкоштева и др. показана интересная особенность затвердевания криволинейного непрерывного слитка. В начальный период скорость затвердевания несколько выше по грани меньшего радиуса r , а затем – по грани большего радиуса R . На основании экспериментальных данных установлено, что скорость кристаллизации возрастает с увеличением расхода воды на вторичное охлаждение.

Из приведенных литературных данных следует, что скорость затвердевания зависит от формы и размеров слитка, от ряда технологических и теплотехнических факторов и изменяется в широких пределах. В связи с этим при проектировании необходимо определять скорость затвердевания для каждого конкретного случая в зависимости от конструктивных и режимных параметров работы МНЛЗ.

Точное знание факторов, которые оказывают влияние на процесс затвердевания, приобретает принципиальную важность с точки зрения как проектирования, так и эксплуатации действующих МНЛЗ. Это связано с тем, что время полного затвердевания слитка при заданной скорости разливки определяет длину жидкой фазы (L_J), которая является одним из важнейших параметров проектирования установки. В общем случае протяженность зоны вторичного охлаждения определяется максимальной длиной, которую может достигать жидкая сердцевина слитка или металургическая длина. Суммарная длина кристаллизатора и ЗВО определяют общую высоту и протяженность технологической линии МНЛЗ.

Влияние процесса затвердевания необходимо учитывать как на стадии проектирования, так и при определении производственной эффективности МНЛЗ. Скорость затвердевания является одним из важнейших факторов, определяющих структурообразование непрерывного слитка. Кроме того знание закономерностей затвердевания необходимо для анализа напряженного состояния слитка.

Величина термических напряжений определяется перепадом температур по сечению (толщине) затвердевшей корочки. Как показывают опыты, уже в течение первых 5 – 10 с от начала разливки перепад температур по толщине корочки составляет $100 \div 200$ °С, что может привести

к возникновению значительных термических напряжений. В связи с этим знание процесса затвердевания представляет собой фундаментальную основу для соответствующего выбора таких основных параметров разливки как скорость разливки, интенсивность и характер первичного и вторичного охлаждения и др.

§ 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЗАТВЕРДЕВАНИЯ

Для исследования процесса затвердевания применяются различные методы.

Экспериментальные методы исследования в производственных условиях применяются для определения положения фронта затвердевания, а также для изучения температурного поля непрерывного слитка.

Метод выливания незатвердевшей части слитка (или метод опрокидывания) позволяет зафиксировать границы затвердевшего металла. При этом так называемая граница выливаемости соответствует изотерме внутри интервала кристаллизации; ее положение зависит от химического состава стали, скорости затвердевания и других факторов. Опытами установлено, что внутренняя полость опрокинутых слитков окаймлена неровным слоем кристаллизующейся стали. Вследствие неравномерности затвердевания по периметру слитка толщина затвердевшей корочки определяется как средняя величина. Однако метод выливания жидкого остатка не всегда дает точные результаты, так как при этом часть жидкости удерживается ветвями растущих кристаллов, что может привести к заметной ошибке при изучении процесса.

Метод ввода индикаторов в жидкую часть слитка в конце разливки также позволяет зафиксировать фронт затвердевания. В качестве индикаторов применяются радиоактивные изотопы и сера. За счет конвекции и диффузии индикатор быстро распределяется в незатвердевшей части слитка. Установлено, что толщина корочки, полученная на авторадиограмме или серном отпечатке, совпадает с данными других методов.

Для определения глубины жидкой фазы и соответственно продолжительности затвердевания слитка используются методы фиксации дна жидкой лунки путем заливки жидкого свинца или зондирования дна лунки специальным стержнем (щупом).

Для исследования температурного поля непрерывного слитка широко используются методы термического анализа, заключающиеся в измерении температур в различных точках сечения слитка. При этом толщина затвердевшей корки металла и глубина жидкой фазы могут быть определены по температурным кривым охлаждения в различных точках сечения слитка.

Оценка скоростей и направления конвективных потоков в жидком ядре слитка может проводиться на основе физического моделирования.

Однако изучение закономерностей распространения струи жидкого металла на гидравлических моделях позволяет получить лишь качественную картину гидродинамических процессов.

На физической модели с легкоплавкими материалами в условиях лаборатории могут изучаться процессы кристаллизации.

Некоторыми авторами процессы затвердевания подробно изучались на гидроинтеграторах и электрических аналоговых моделях. Аналитические методы решения задач затвердевания позволяют установить распределение температур в кристаллизующемся слитке в виде непрерывных функций координат и времени.

В настоящее время известен ограниченный круг задач кристаллизации, для которых возможно точное аналитическое решение.

Одним из немногих примеров точного решения является классическая задача Стефана о промерзании грунта. Однако применительно к затвердеванию стального слитка в этой задаче принимаются упрощенные граничные и некоторые другие условия затвердевания. Двухфазная зона заменяется некоторой гладкой изотермической поверхностью с сосредоточенным источником тепла. Фазовый переход осуществляется не в интервале температур, а при одной постоянной температуре. Предполагается, что на поверхности мгновенно устанавливается $t_{\text{п}}$, которая и остается постоянной. Физические свойства от нее не зависят. Рассматривается плоская задача, в которой имеется перемещающаяся граница.

Из рассмотрения данной задачи делается основной вывод о том, что при затвердевании темп движения фронта кристаллизации затухает во времени по закону квадратного корня.

Ценность этого решения состоит в том, что до настоящего времени в практических расчетах широко используется полученный закон квадратного корня, связывающий толщину твердой корочки со временем затвердевания.

В реальных условиях кристаллизации стали температура поверхности изменяется в значительных пределах, поэтому при расчетах необходимо учитывать соответствующие поправки.

Плодотворными и всесторонними являются методы математического моделирования, позволяющие определять температурные поля в кристаллизующемся непрерывном слитке и анализ протекающих процессов на основе численных методов расчета с применением ЭВМ. Использование ЭВМ снимает вычислительные трудности и позволяет решать практически любые задачи. При этом математические модели позволяют учитывать важнейшие характерные черты процесса кристаллизации: сложные граничные условия, изменяющиеся по зонам, выделение скрытой теплоты кристаллизации в интервале температур и связанные с этим процессы образования кристаллов, различные особенности технологии и другие вопросы.

На основе метода математического моделирования можно проводить

расчетно-теоретические исследования процесса затвердевания, определять основные технологические и теплотехнические параметры.

При использовании метода математического моделирования теория кристаллизации и затвердевания слитков становится рабочим инструментом инженеров-технологов и проектировщиков, занимающихся совершенствованием производственных процессов на действующих агрегатах или разрабатывающих и проектирующих новые конструкции МНЛЗ. На современном уровне теоретическое изучение проблем, возникающих при непрерывной разливке, немыслимо без применения математических моделей охлаждения и затвердевания слитка.

Практическая задача определения динамики затвердевания расплава, включающая определение температурного поля, толщины твердой корки и скорости продвижения фронта затвердевания, а также времени полного затвердевания слитка и глубины жидкой фазы, может быть решена современными средствами математического моделирования с достаточной для практических целей точностью. Определение этих параметров позволяет более конкретно анализировать сложные явления, сопровождающие процесс формирования кристаллической структуры непрерывного слитка.

С целью определения параметров твердо-жидкой зоны, а также решения ряда практических вопросов, связанных с формированием слитка, используют задачу о нахождении температурного поля в затвердевающем слитке. Расчетно-теоретические исследования затвердевания основываются на математических моделях процессов, которые определяются теплофизическими процессами в непрерывном слитке.

В сложной системе уравнений, описывающих процессы затвердевания, важнейшими являются уравнения переноса энергии и теплопроводности, в основном определяющие процессы затвердевания слитка.

Для описания процесса затвердевания за основу принимается дифференциальное уравнение энергии с внутренними источниками тепла, особенностью которого для зоны кристаллизации является учет выделяющейся теплоты кристаллизации.

Уравнение энергии при наличии внутренних источников тепла записывается в общем виде как

$$\rho(Di/d\tau) = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} t) + q_V, \quad (35)$$

где $(Di/d\tau)$ – полная (субстанциальная) производная энталпии по времени; q_V – плотность внутренних источников тепла; ρ – плотность металла; λ – коэффициент теплопроводности металла; t – температура.

При условии неподвижной среды ($w = 0$) и при постоянных физических свойствах оно записывается в виде:

$$\rho C(dt/d\tau) = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} t) + q_V, \quad (36)$$

где C – теплоемкость металла.

Существуют различные подходы к решению задачи затвердевания.

В работах Г. П. Иванцова и А. И. Вейника применялся кинетический подход, при котором авторы полагали, что определяющим фактором процесса затвердевания являлось переохлаждение расплава, поэтому анализ формирования структуры отливок проводился с учетом скорости зарождения и роста кристаллов.

В работе Ю. А. Самойловича и др. была предпринята попытка построения математической модели кристаллизации отливки, учитывающей закономерности роста кристаллов в переохлажденных зонах расплава, а также нестационарное и неравномерное по сечению слитка поле температур. Однако в данной модели встретились методические трудности из-за неопределенности величины объемной концентрации центров кристаллизации и недостаточно обоснованного принятия линейной зависимости скорости роста кристаллов от переохлаждения для сталей. Кроме того, модель получилась весьма громоздкой, что затрудняет ее реализацию на ЭВМ. В связи с этим более доступными и удобными являются модели, не связанные с кинетикой зарождения и роста кристаллов.

В работе В. А. Журавлева и Е. М. Китаева в общей постановке развита математическая модель, которая рассматривает кристаллизацию непрерывного слитка как результат одновременного протекания тепловых, диффузионных и гидродинамических явлений. Такая модель представляет большой принципиальный интерес с точки зрения исследования условий получения бездефектного литого металла, так как картина физических явлений, протекающих в твердой, жидкой и двухфазной зонах, состоит из совокупности взаимосвязанных процессов тепло-массопереноса.

Практическая реализация такой сложной модели встречает серьезные трудности, поэтому в инженерной практике используются упрощенные варианты подобной модели для достижения главной цели – исследования тепловых режимов формирования непрерывного слитка.

В последнее время для решения задач затвердевания металлических сплавов широко используют теорию "квазиравновесной" двухфазной зоны, развитую в работах В. Т. Борисова. Эта теория не учитывает кинетическое и концентрационное (или диффузионное) переохлаждение расплава, так как их величины для реальных условий малы. По опытным данным величина переохлаждения не превышает 1°C , поэтому при математическом моделировании ею можно пренебречь. В указанной теории выявлена высокая скорость роста твердой фазы при малых отклонениях от равновесных условий. Это позволяет считать, что жидкость и твердая фаза находятся в равновесии в каждом элементарном объеме двухфазной области. Внутри двухфазной зоны в каждом физически малом элементе, содержащем обе фазы, концентрация жидкости и температура связаны условием равновесия, т. е. уравнением линий ликвидуса распла-

ва: $T_{\text{л}} = f(p)$, где $T_{\text{л}}$ – температура ликвидуса; p – концентрация растворенного элемента. Это означает, что внутри двухфазной зоны нет переохлажденной жидкости или перегретой твердой фазы.

В систему уравнений теории квазиравновесной двухфазной зоны входят уравнения теплопроводности и переноса массы в жидкой части двухфазной области.

Решение этой системы с соответствующими начальными и граничными условиями позволяет определить температурное поле в слитке, поле концентраций и доли жидкой фазы. Однако практическое решение приведенной системы уравнений также встречает ряд методических трудностей.

В рамках теории квазиравновесной двухфазной зоны существует еще одна модель охлаждения и затвердевания сплава, разработанная во ВНИИМТ и подробно изложенная в работах Ю. А. Самойловича.

Используется дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности (36) с учетом выделяющейся теплоты кристаллизации $q_{\text{кр}}$, а также соотношения твердой и жидкой фаз. Принимается, что выделение теплоты плавления происходит по линейному закону в соответствии с правилом рычага. При этом вводится величина относительного количества твердой фазы $\psi = V_{\text{тв}}/V_0$, которая по смыслу может рассматриваться как относительное количество еще не выделившегося тепла кристаллизации, V_0 и $V_{\text{тв}}$ – соответственно объемы всего расплава и твердой фазы; $\psi = 0$ для жидкой фазы, $\psi = 1$ для полностью затвердевшей части слитка и для двухфазной зоны может изменяться от нуля до единицы.

С введением величины ψ для кристаллизующегося слоя величина плотности внутреннего источника тепла

$$q_V = q_{\text{кр}} \rho (\partial \psi / \partial t), \quad (37)$$

где $q_{\text{кр}}$ – скрытая теплота кристаллизации; ρ – плотность металла; t – время; $\partial \psi / \partial t$ – скорость затвердевания сплава.

Тогда

$$\rho C (\partial t / \partial \tau) = \text{div} (\lambda \text{grad} t) + \rho q_{\text{кр}} (\partial \psi / \partial t). \quad (38)$$

Для упрощения методики решения задач затвердевания теплоту кристаллизации учитывают при помощи введения эффективной теплоемкости C_3 .

Используя подстановку $(\partial \psi / \partial t) = (\partial \psi / \partial t) (\partial t / \partial \tau)$, запишем дифференциальное уравнение теплопроводности:

$$\rho C_3 (t) (\partial t / \partial \tau) = \text{div} (\lambda \text{grad} t), \quad (40)$$

где величина эффективной теплоемкости задается в виде системы:

$$C_3 (t) = \begin{cases} C_{\text{ж}} & \text{при } t > t_{\text{л}} \\ C(t) - q_{\text{кр}} (\partial \psi / \partial t) & \text{при } t_{\text{c}} < t < t_{\text{л}} \\ C_{\text{т}} & \text{при } t < t_{\text{c}} \end{cases} \quad (41)$$

Таким образом, учет выделения теплоты кристаллизации в двухфазной зоне сводится к соответствующему заданию зависимости $C_3 = C_3 (t)$.

Относительное количество твердой фазы, находящейся в равновесии с жидкостью при t , может быть определено из диаграммы состояния сплава Fe – С по правилу рычага.

Если принять, что линии ликвидуса и солидуса – параллельные прямые, то

$$\psi = (t_{\text{л}} - t) / (t_{\text{л}} - t_{\text{c}}). \quad (42)$$

При постоянном темпе кристаллизации сплава внутри интервала температур $t_{\text{л}} - t_{\text{c}}$ величина $-(\partial \psi / \partial t) = [1 / (t_{\text{л}} - t_{\text{c}})]$.

В ряде работ показано, что различные способы задания функции $C_3 (t)$ по сравнению с условием $C_3 = \text{const}$ незначительно изменяют температурные кривые, практически не отражаясь на общей продолжительности процесса затвердевания. Для решения многих практических задач можно с достаточной степенью точности принять для интервала кристаллизации величину теплоемкости постоянной, определяемой как средняя величина между $C_{\text{ж}}$ и $C_{\text{т}}$. Тогда значение эффективной теплоемкости в интервале температур $(t_{\text{л}} - t_{\text{c}})$ определится как

$$C_3 (t) = [(C_{\text{т}} + C_{\text{ж}})/2] + [q_{\text{кр}} / (t_{\text{л}} - t_{\text{c}})].$$

Из результатов многих исследований следует вывод, что существенное влияние на ход процессов кристаллизации оказывает гидродинамика расплава, однако непосредственное измерение скоростей конвективных потоков в жидком ядре слитка представляет значительные трудности.

В работах ряда авторов предлагается косвенный способ учета явлений гидродинамического перемешивания расплава в жидком ядре. Для учета явлений конвективного теплопереноса в жидкой фазе вводят понятие эффективного коэффициента теплопроводности (λ_3), значение которого принимают в несколько раз больше коэффициента теплопроводности в жидкой фазе. По качественной оценке эффективного коэффициента в литературе встречаются противоречивые данные: одни авторы предполагают увеличивать величину λ_3 в 5–10 раз, а другие в 10–50 раз.

Эти данные требуют дальнейших исследований и уточнений. В практических исследованиях результаты расчетно-теоретического анализа удовлетворительно согласуются с экспериментальными при кратности увеличения λ_3 в пределах 2–5.

Существенные расхождения в данных показывают, что в настоящем

время не существует однозначного подхода к проблеме учета гидродинамических явлений в жидкой фазе непрерывного слитка, что вызывает необходимость дальнейшего изучения данной проблемы.

Выразив значение эффективной теплопроводности λ_3 с учетом соотношения фаз, можно окончательно записать дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности:

$$\rho C_3(t) (\partial t / \partial \tau) = \operatorname{div}(\lambda_3 \operatorname{grad} t); \quad (43)$$

коэффициент эффективной теплоемкости:

$$C_3(t) = \begin{cases} C_{\text{ж}} & \text{при } t > t_{\text{л}} \\ (C_{\text{т}} + C_{\text{ж}})/2 + q_{\text{kp}}/(t_{\text{л}} - t_{\text{c}}) & \text{при } t_{\text{c}} < t < t_{\text{л}} \\ C_{\text{т}} & \text{при } t < t_{\text{c}}; \end{cases} \quad (44)$$

коэффициент эффективной теплопроводности:

$$\lambda_3 = \begin{cases} \lambda_{\text{ж}} & \text{при } t > t_{\text{л}} \\ \lambda_{\text{т}} \psi + \lambda_{\text{ж}} (1 - \psi) & \text{при } t_{\text{c}} < t < t_{\text{л}} \\ \lambda_{\text{т}} & \text{при } t < t_{\text{c}}. \end{cases} \quad (45)$$

В зависимости от формулировки задачи исследований задаются условия однозначности. Начальные условия обычно характеризуют распределение температур в начальный момент времени. Например, при $t = 0, t = t_0$, где t_0 — начальное значение температуры металла.

Границные условия, характеризующие процесс теплообмена на поверхности, задаются для каждой зоны МНЛЗ с учетом особенностей теплообмена.

При решении различных задач могут задаваться граничные условия 1, 2 или 3-го рода. Кроме того, в условиях однозначности задаются форма и размеры слитка, физические свойства металла, охлаждающей воды и др.

Вышеприведенная система уравнений (43–45) вместе с условиями однозначности представляет собой полную формулировку математической модели процесса затвердевания непрерывного слитка.

Решение этой системы позволяет определить температурное поле непрерывного слитка в любой момент времени от начала формирования оболочки слитка на уровне металла в кристаллизаторе и другие параметры, а также исследовать влияние внешних условий на тепловой режим формирования непрерывного слитка.

Метод математического моделирования может быть использован как для проектирования новых установок, так и при реконструкции или изменении режимов работы МНЛЗ с целью повышения производительности.

§ 3. МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭВМ

Для решения многих инженерных задач широко используются численные методы решения дифференциальных уравнений. Одним из наиболее распространенных и эффективных является метод конечных разностей или метод сеток. Сущность его можно рассмотреть на простом примере одномерной задачи нестационарной теплопроводности, которая может с достаточной точностью применяться для расчетов затвердевания широких слябов с соотношением сторон более 4.

Реальная область исследования разбивается на части, а бесконечно малые приращения заменяются конечными разностями. Тогда характеристическое дифференциальное уравнение теплопроводности

$$\rho C_3(t) (\partial t / \partial \tau) = \lambda_3 (\partial^2 t / \partial x^2) \quad (46)$$

заменяется эквивалентным выражением в конечных разностях:

$$\rho C_3(t) (\Delta t / \Delta \tau) = \lambda_3 [\Delta^2 t / (\Delta x)^2]. \quad (47)$$

Поверхность твердого тела в направлении оси x можно разбить на i равных слоев толщиной Δx , где i — порядковый номер каждого слоя. Период времени также разбивается на равные промежутки времени Δt с порядковыми номерами $(k-1), k, (k+1)$ и т.д. Предполагается, что температура каждого слоя характеризуется ее значением на оси слоя, тогда температурная кривая, характеризующая распределение температур в направлении x , может быть заменена ломаной линией.

С помощью метода конечных разностей определяется значение температуры в каждом слое, например, $(\Delta x)_i$ в последующий момент времени $(k+1)$ через известные значения температур в предыдущий момент времени k . Заменим производные их конечно-разностными аналогами, т.е.

$$(\partial t / \partial \tau)_{i, k} = (t_{i, k+1} - t_{i, k}) / \Delta \tau;$$

$$(\partial^2 t / \partial x^2)_{i, k} = (t_{i+1, k} - 2t_{i, k} + t_{i-1, k}) / (\Delta x)^2.$$

После этой замены и соответствующих преобразований получается решение в виде несложного алгебраического уравнения:

$$t_{i, k+1} = t_{i, k} + \frac{a \Delta \tau}{\Delta x^2} (t_{i+1, k} - 2t_{i, k} + t_{i-1, k}). \quad (48)$$

По этому уравнению можно определить значения температуры во всех точках расчетной области, кроме первой и последней, в $(k+1)$

момент времени, если известны температуры во всех узлах сетки в предыдущий k -й момент времени. В этом выражении комплекс величин перед скобками по физическому смыслу представляет собой критерий Фурье:

$$Fo = (a\Delta t)/\Delta x^2.$$

Точность решения задачи зависит от величины выбранных промежутков Δx и Δt . Чем меньше эти величины, тем точнее результаты численных расчетов. Величины Δx и Δt связаны между собой критерием Фурье. На практике обычно выбирают произвольно величину Δx , а значение расчетного промежутка времени Δt определяется из условия устойчивости решения, которое определяется как $Fo \leq 1/2$.

Для упрощения расчетов часто принимают наибольшее допустимое значение $Fo = 1/2$.

Тогда из соотношения $a\Delta t/\Delta x^2 = 1/2$ величина расчетного промежутка времени определится как

$$\Delta t = \Delta x^2/2a. \quad (49)$$

В этом случае при подстановке величины критерия Фурье в выражение (48) предельно упрощается расчетная формула для определения температуры в данной точке i в промежуток времени $(k+1)$:

$$t_{i, k+1} = (t_{i+1, k} + t_{i-1, k})/2. \quad (50)$$

Это означает, что по истечении времени Δt , т.е. в следующий промежуток времени температура в расчетной точке i определяется как среднегарифметическая величина из температур смежных слоев в предыдущий (т.е. начальный) момент времени k .

Результаты расчетов показывают, что чем меньше выбирается величина толщины слоя Δx , тем ближе численные результаты к соответствующим точным значениям температур. Это называется сходимостью численного решения. Однако при этом значительно возрастает объем вычислений.

Проблема устойчивости разностного уравнения связана с вопросом о том, накапливаются ли или убывают со временем числовые ошибки при округлении чисел.

Анализ условия устойчивости показывает, что в процессе с кратковременным периодом охлаждения или нагревания, для получения более точных числовых результатов необходимо пользоваться значением $Fo < 1/4$. Но в большинстве случаев хорошие результаты получаются при значениях $Fo \geq 1/4$. Тогда для соблюдения устойчивости решения расчетный промежуток времени определится из условия:

$$\Delta t = \Delta x^2/(4a_{\max}), \quad (51)$$

где a_{\max} – максимальное значение коэффициента температуропроводности в расчетной области.

Для рассматриваемой одномерной задачи расчетная область представляет половину толщины слитка δ вследствие симметричности охлаждения. Разбиваем расчетную область сеткой с шагом $\Delta x = \delta/(n-1)$, где n – число точек сетки. Расчетный промежуток времени определяем из условия устойчивости.

Решение задачи начинается с реализации начальных условий путем присвоения всем $(n+1)$ точкам разбиения расчетной области заданной начальной температуры $t_{i, 0} = t_0$, где t_0 – начальная температура металла на уровне верха кристаллизатора, равная температуре жидкого металла, поступающего в него из промежуточного ковша.

При задании граничных условий, например, второго рода $-\lambda(\partial t/\partial x)|_{x=0} = q$ их конечноразностная интерпретация представится в виде:

$$-\lambda(t_{1, k+1} - t_{2, k+1})/\Delta x = q_k. \quad (52)$$

Из этого уравнения следует, что температуру на поверхности слитка (в первом узле сетки) можно определить по выражению:

$$t_{1, k+1} = t_{2, k+1} - q_k \Delta x / \lambda, \quad (53)$$

а значение q_k в k -й момент времени можно определить по формуле (7). Для расчета температуры в последнем узле расчетной области $t_{n, k+1}$ вводят еще один условный слой по координате x . В силу симметричности температурного поля слитка $t_{n+1, k} = t_{n-1, k}$.

Зная таким образом температуру в дополнительной $(n+1)$ точке в момент времени k , можно определить значение температуры в последней n -й точке расчетной области, воспользовавшись уравнением (48). Так как охлаждение слитка симметрично, то достаточно рассмотрение расчетной области, соответствующей половине толщины слитка (δ). Следовательно, второй границей этой области служит ось симметрии, на которой должно соблюдаться условие: $(\partial t/\partial x)|_{x=\delta} = 0$. Далее все расчеты температур проводятся по формуле (48).

По описанному алгоритму можно составить программу для расчетов на ЭВМ.

Результаты расчетов позволяют определять значения температур по толщине оболочки слитка в любой, кратный Δt , момент времени, изменение температуры поверхности слитка, толщину его оболочки, определяемую по координате точки при t_c .

При использовании численных методов можно учитывать изменение основных параметров от температуры, сложные граничные условия и т.д. Таким образом, эти методы позволяют отказаться от упрощенной трактовки математической модели процесса затвердевания непрерывного слитка и получить высокую точность решения.

Ввиду большой сложности задачи и трудоемкости вычислений математическое моделирование осуществляется с помощью электронных цифровых вычислительных машин.

Трудность точной оценки отдельных параметров не позволяет пока получить достаточно полного представления о динамике кристаллизации реального сплава в сложных условиях, поэтому существующие математические модели затвердевания непрерывных слитков требуют дальнейшей экспериментальной проверки и уточнения.

В этих условиях целесообразно применение комплексной методики, сочетающей расчетно-теоретический анализ на основе применения ЭВМ с экспериментальным изучением тепловой работы МНЛЗ.

§ 4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ С ПОМОЩЬЮ ЭВМ

В Липецком политехническом институте проводились расчетно-теоретические исследования процесса затвердевания непрерывных слитков для МНЛЗ вертикального и криволинейного типа в условиях НЛМК.

Исходя из условия построения негромоздкой модели, достаточно гибкой в отношении ее реализации на ЭВМ, приняли "энергетический" вариант с приближенным заданием теплофизических свойств и применением диаграммы состояния Fe – С для определения доли твердой фазы ψ и температур солидуса и ликвидуса (t_c и t_p).

В отличие от аналогичных моделей, известных из литературных источников, в данной модели по методике, разработанной Л. И. Урбановичем, проводился расчет длины зон относительно плотного контакта на основе экспериментальных данных, что позволяло более точно определять условия теплообмена в кристаллизаторе.

В основу математической модели положено дифференциальное уравнение теплопроводности в двухмерном пространственном представлении с учетом выделения теплоты кристаллизации в интервале температур ликвидус – солидус.

При построении модели приняты следующие допущения:

- начало координат движется вниз вместе со слитком с постоянной скоростью, равной скорости вытягивания слитка;

- перенос тепла вдоль продольной оси (в направлении вытягивания) пренебрежимо мал по сравнению с переносом тепла в поперечных направлениях;

- граничные и начальные условия симметричны относительно геометрических осей симметрии прямоугольного сечения слитка, поэтому решение реализуется для одной четверти сечения;

- для задания граничных условий вдоль продольной оси слитка выделяются четыре характерные зоны: относительно плотного контакта в верхней части кристаллизатора: с газовым зазором в нижней части

кристиализатора; водяного форсуночного охлаждения; охлаждения слитка на воздухе.

Дифференциальное уравнение теплопроводности (43) для двухмерной задачи запишется в развернутом виде:

$$\rho C_3 (\partial t / \partial \tau) = \partial / \partial x [\lambda_3 (\partial t / \partial x)] + \frac{\partial}{\partial y} [\lambda_3 (\partial t / \partial y)]. \quad (54)$$

Значения эффективных теплоемкости и теплопроводности определялись по зависимостям (44) и (45), пределы изменения координат составляли $0 < x < l_w$; $0 < y < l_y$, где x и y – линейные координаты вдоль продольной и поперечной сторон прямоугольного сечения слитка; l_w и l_y – соответственно ширина половины широкой и узкой граней слитка.
Начальные условия: $t = 0$, $t = t_0$, где t_0 – начальная температура металла.

Начальное распределение температуры задавалось в виде квадратичного полинома в зависимости от координат вдоль широкой и узкой граней слитка:

$$t = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 x^2 + a_4 y^2,$$

где a_0 ; a_1 ; a_2 ; a_3 ; a_4 – соответствующие расчетные коэффициенты.

Границные условия: для зоны относительно плотного контакта в верхней части кристаллизатора

$$-\lambda (\partial t / \partial n)_{n=0} = K(t_p - t_b),$$

где $n = x$; $n = y$ соответственно грани, t_p – температура поверхности слитка; t_b – средняя температура охлаждающей воды; K – средний по высоте зоны коэффициент теплопередачи между поверхностью слитка и охлаждающей водой.

По опытным данным величина коэффициента теплопередачи для зоны плотного контакта изменяется в пределах $1,163 \div 1,63 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

В зоне с газовым зазором в нижней части кристаллизатора

$$-\lambda (\partial t / \partial n)_{n=0} = \alpha_g (t_p - t_1),$$

где коэффициент теплоотдачи излучением определяется по формуле:

$$\alpha_g = \frac{c_0}{(1/\epsilon_1) + (1/\epsilon_2) - 1} \left[\left(\frac{t_p + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_1 + 273}{100} \right)^4 \right] / (t_p - t_1);$$

где ϵ_1 и ϵ_2 – соответственно степень черноты поверхности стального слитка и внутренней поверхности стенки кристаллизатора; c_0 – коэффициент излучения черного тела; t_1 – температура внутренней (рабочей) поверхности стенки кристаллизатора.

Для зоны форсуночного водяного охлаждения

$$-\lambda(\partial t/\partial n)_{n=0} = \bar{\alpha}(t_{\text{п}} - t_{\text{в}}).$$

Границные условия 3-го рода задавались для каждой секции зоны вторичного охлаждения. Средний коэффициент $\bar{\alpha}$ определялся в каждой секции в зависимости от плотности орошения. Величина коэффициента теплоотдачи конвекцией рассчитывалась по критериальной зависимости типа $Nu = f(Re)$.

В зоне воздушного охлаждения

$$-\lambda(\partial t/\partial n)_{n=0} = \alpha_{\Sigma}(t_{\text{п}} - t_{\text{в}}),$$

где α_{Σ} — суммарный коэффициент теплоотдачи, учитывающий излучение и конвекцию; $t_{\text{в}}$ — температура окружающего воздуха.

Для решения двухмерной задачи поверхность слитка разбивается на конечные слои толщиной Δx и Δy , тогда в поперечном сечении слитка образуется сеточная область с шагом между узлами сетки соответствен-но $(\Delta x)_i$ по широкой грани и $(\Delta y)_j$ по узкой, а нумерация слоев по широкой грани i , по узкой грани $-j$. Период времени также разделяется на конечные интервалы величиной Δt с нумерацией k .

После замены частных производных в дифференциальном уравнении (54) разностными соотношениями и соответствующих преобразований получим решение в виде системы алгебраических уравнений, позволяющих рассчитать значения температур и других величин в узлах сеточной области.

Искомая температура для заданной точки в $(k+1)$ -й момент времени определится через известные значения температур в предыдущий k -й момент времени по следующей формуле:

$$\begin{aligned} t_{i; j; k+1} &= t_{i; j; k} + (a\Delta t/\Delta x^2)(t_{i-1; j; k} - 2t_{i; j; k} + t_{i+1; j; k}) + \\ &+ \frac{a\Delta t}{\Delta y^2}(t_{i; j-1; k} - 2t_{i; j; k} + t_{i; j+1; k}), \end{aligned} \quad (55)$$

где коэффициент температуропроводности $a = \lambda_3/(\rho C_3)$.

Границные условия 3-го рода для широкой грани в конечных разностях записутся как

$$-\lambda \frac{t_{1; j; k} - t_{2; j; k}}{\Delta x} = K \left(\frac{t_{1; j; k} + t_{2; j; k}}{2} - t_{\text{в}} \right),$$

где точки $1; j; k$ являются вспомогательными, отстоящими на расстоя-

нии $0,5\Delta y$ от широкой грани. Из последнего соотношения для широкой грани получим:

$$t_{1; j; k} = \frac{Kt_{\text{в}} + [(\lambda/\Delta x) - (K/2)]t_{2; j; k}}{(K/2) + (\lambda/\Delta x)}. \quad (56)$$

Аналогично для узкой грани:

$$t_{i; 1; k} = \frac{Kt_{\text{в}} + [(\lambda/\Delta y) - (K/2)]t_{i; 2; k}}{(K/2) + (\lambda/\Delta y)}. \quad (57)$$

Для определения протяженности зон относительно плотного контакта применялся метод итераций. По опытным данным для конкретных размеров слитка устанавливалось соотношение между расходами охлаждающей воды в кристаллизаторе на широкие и узкие грани. При расчетах принималось, что теплоотвод через широкие и узкие грани находится в той же пропорции. Нагрев охлаждающей воды в кристаллизаторе принимался по опытным данным.

Задаваясь последовательно длиной зоны плотного контакта (отдельно для широкой и узкой граней), по уравнениям (55—57) вычисляли температурное поле слитка в кристаллизаторе; распределение плотности теплового потока по периметру слитка $q = -\lambda(\partial t/\partial n)_{n=0} = 0$.

Время нахождения слитка в зонах контакта $\tau_{\text{пк}}$ и с зазором $\tau_{\text{гз}}$ определялось по формулам:

$$\tau_{\text{пк}} = h_{\text{пк}}/\nu; \tau_{\text{гз}} = (h_{\text{к}} - h_{\text{пк}})/\nu,$$

где $h_{\text{пк}}$ и $h_{\text{к}}$ — соответственно длина зоны плотного контакта и рабочая высота кристаллизатора; ν — скорость вытягивания слитка.

При заданных длинах зон плотного контакта рассчитывалось количество тепла, отводимое от слитка, и сравнивалось с экспериментальными величинами. В случае расхождения опытных и расчетных величин проводится корректировка значений длин зон плотного контакта, и описанные выше операции повторяются вновь для новых условий до полного совпадения расчетного и экспериментального значений теплоотвода.

Для поиска зон относительно плотного контакта была составлена специальная подпрограмма на алгоритмическом языке "Фортран-2".

Этот же язык использовался для численного решения дифференциального уравнения теплопроводности (54) с краевыми условиями; расчеты проводились на ЭЦВМ типа "М-222". В программе предусматривалось получение распределения температуры по поперечному сечению слитка на данной высоте, тепловых потоков по периметру слитка, толщины затвердевающей корочки по широким и узким граням.

Описанная математическая модель позволяла проводить расчетные исследования по определению теплового состояния непрерывного слитка для различных скоростей разливки, значений перегрева металла и различной интенсивности теплообмена в кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения.

Адекватность математической модели в описании реального процесса затвердевания и охлаждения слитка проверялась по сходимости расчетных значений глубины полного затвердевания и температур с экспериментальными данными.

Далее приводятся несколько примеров практического применения метода математического моделирования для расчетно-теоретического анализа тепловой работы МНЛЗ и исследования процесса затвердевания и охлаждения непрерывных слитков.

Пример 1. Для вертикальной МНЛЗ проведены расчетные исследования затвердевания и охлаждения непрерывного слитка сечением $0,24 \times 1,71 \text{ м}^2$ из стали 17Г2СФ применительно к условиям НЛМК.

Четвертая часть прямоугольного сечения слитка (размером $0,12 \times 0,855 \text{ м}^2$) разбивалась квадратной сеткой с шагом $\Delta x = \Delta y = 0,015 \text{ м}$ с образованием 59 точек вдоль широкой грани и 10 точек вдоль узкой. При этом получилось отношение числа узлов вдоль широкой грани к числу узлов для узкой приблизительно равным отношению размеров сторон прямоугольного сечения слитка. Шаг по времени определялся из условия устойчивости конечно-разностной схемы, т.е. $\Delta t = 3,214 \text{ с}$. Расчетные размеры слитка по широкой и узкой граням составляли: $l_w = 0,855 \text{ м}$; $l_y = 0,12 \text{ м}$.

Высота кристаллизатора выбиралась 1,2 м; с учетом возможного снижения уровня металла рабочая высота кристаллизатора составляла 1,05 м. Протяженность зоны вторичного водяного охлаждения и каждой секции, а также зоны охлаждения на воздухе задавались по промышленным условиям в соответствии со схемой технологической линии МНЛЗ.

Значения теплофизических параметров определялись по справочным данным для соответствующей марки стали. В расчетах принимались значения $q_{kp} = 272,3 \text{ кДж/кг}$; $t_p = 1520^\circ\text{C}$; $t_c = 1490^\circ\text{C}$.

Сравнение расчетных данных с экспериментальными показало, что

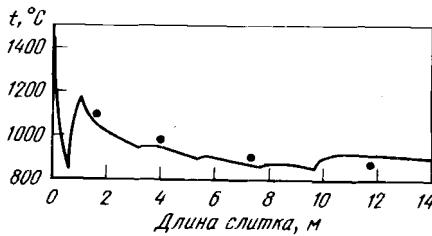


Рис. 36. Изменение температуры поверхности по середине широкой грани (точки – опытные данные)

при $v = 0,4 \text{ м/мин}$, температуре разливки 1535°C , расходе воды на кристаллизатор $500 \text{ м}^3/\text{ч}$ и нагреве охлаждающей воды в кристаллизаторе на 5°C расчетное значение глубины полного затвердевания слитка 7,7 м хорошо согласуется с экспериментальным заводским результатом при введении свинца – 7,6 м.

На рис. 36 приведен расчетный график изменения температуры поверхности по середине широкой грани слитка в зависимости от высоты слитка. Там же точками нанесены опытные значения температуры поверхности, полученные в условиях действующей МНЛЗ с помощью оптического пирометра. Как следует из рис. 36, расхождение расчетных и опытных значений температуры не превышает 5 %, что свидетельствует об их удовлетворительном совпадении и подтверждении адекватности разработанной математической модели.

На рис. 37 показано изменение толщины затвердевающей корочки по середине широкой и узкой граней слитка для разных скоростей разливки. Из приведенных графиков может быть определена глубина полного затвердевания слитка, которая при $v = 0,4; 0,55$ и $0,7 \text{ м/мин}$ составляет соответственно $L_{ж} = 7,7; 11,0$ и $13,5 \text{ м}$. Эти данные свидетельствуют о значительном влиянии скорости разливки на глубину жидкой фазы в затвердевающем слитке.

На вертикальной МНЛЗ тянувшие валки расположены на 14 м ниже мениска металла в кристаллизаторе. С учетом этого из полученных расчетных результатов следует весьма важный практический вывод о том, что превышение скорости вытягивания выше $0,7 \text{ м/мин}$ связано с попа-

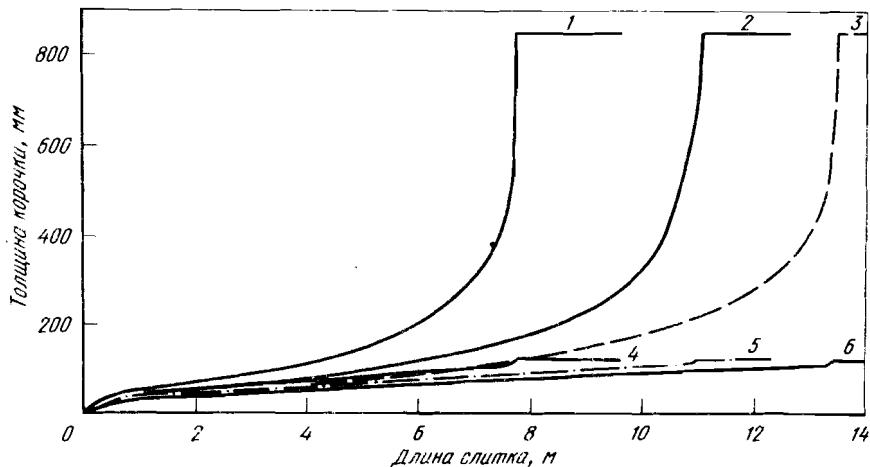
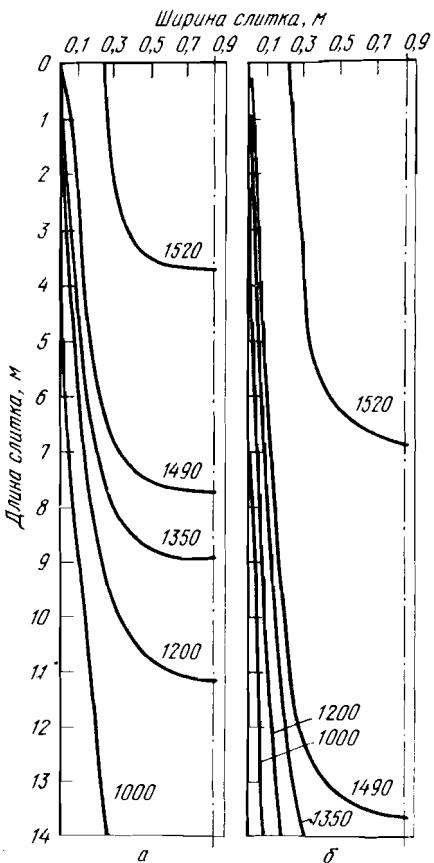


Рис. 37. Изменение толщины корочки для узкой (1, 2, 3) и широкой (4, 5, 6) граней при скорости разливки, м/мин: 0,4; 0,55; 0,7

данием сердцевины слитка с незатвердевшей двухфазной областью втягивающие валки, что недопустимо из-за возможности образования при этом характерных внутренних трещин.

Таким образом, на основе математического моделирования для различных скоростей разливки возможно прогнозирование глубины жидкой лунки, которая является одним из важнейших технологических и конструктивных параметров МНЛЗ. По-видимому, для данной конструкции вертикальных машин НЛМК скорость разливки 0,7 м/мин является предельной при существующих режимах охлаждения.

На основе расчетов можно установить влияние температуры стали на возможную глубину жидкой фазы. Например, при увеличении температуры разливки с 1535 до 1560°C глубина полного затвердевания возрастает соответственно при $v=0,4$ м/мин на 4,15 %, а при $v=0,7$ м/мин на 5,06 %.



Расчетами установлена конкретная зависимость толщины корочки от скорости разливки. Так, в момент выхода из кристаллизатора толщина затвердевающей корочки слитка по середине широкой грани для скоростей разливки 0,4 и 0,7 м/мин соответственно равна 37 и 22 мм, а для середины узкой грани — 50 и 35 мм.

Увеличение скорости разливки с 0,4 до 0,7 м/мин при постоянном теплоотводе вызывает уменьшение толщины корочки на 14–18 %; увеличение теплоотвода на 22 % приводит к возрастанию толщины корочки на 4:9 % и незначительно сказывается на уменьшении глубины жидкой фазы (она уменьшается на 3–6 %).

Рис. 38. Изотермы в сечении слитка при скоростях разливки, м/мин:
а – 0,4; б – 0,7

На рис. 38 представлены расчетные изотермы для продольного сечения, параллельного широкой грани слитка, на расстоянии 112,5 мм от поверхности при $v=0,4$ и 0,7 м/мин. С помощью этого рисунка можно проследить продвижение изотерм в сечении слитка, динамику нарастания твердой корочки и ширины двухфазной зоны, а также определить перепады температур в различных точках.

Область, заключенная между изотермами $t_c=1490^\circ\text{C}$ и $t_u=1520^\circ\text{C}$, является переходной. Возрастание скорости разливки приводит к сокращению ширины двухфазной области, но одновременно и к существенному увеличению глубины жидкой фазы. Из рис. 38 следует, что одноименные изотермы при возрастании скорости разливки смещаются ближе к поверхности грани.

На рис. 39 приведены расчетные графики изменения температуры поверхности слитка по середине широкой и середине узкой граней для $v=0,4$ и 0,7 м/мин. Расчеты проведены при наличии охлаждения по узким граням в пределах 1-й секции. Как следует из рисунка, при $v=0,4$ м/мин температуры поверхности по широкой и узкой граням вначале близки друг к другу, но затем вследствие более высокого темпа охлаждения узкой грани в конце ЗВО температура ее поверхности становится ниже, чем по широкой грани примерно на 200°C. При $v=0,7$ м/мин имеет место расхождение $\sim 100^\circ\text{C}$ между температурами поверхности широкой и узкой граней непосредственно после кристаллизатора, а далее в ЗВО эти температуры отличаются незначительно.

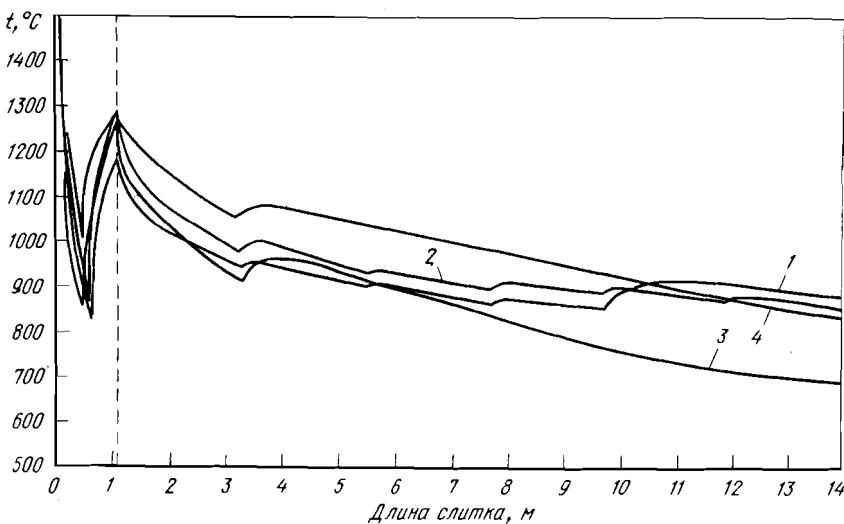


Рис. 39. Изменение температуры поверхности для узкой (1, 2) и широкой (3, 4) граней соответственно при скорости разливки 0,4; 0,7

На основании проведенного сравнения можно сделать практический вывод о целесообразности уменьшения охлаждения узкой грани при $v = 0,4 \text{ м/мин}$.

Таким образом, разработанная математическая модель и проведенные расчеты позволяют прогнозировать изменение температурного поля по сечению слитка, глубины жидкой фазы, ширины двухфазной области и других параметров при освоении повышенных скоростей разливки.

Пример 2. Для условий примера 1 проводился расчетно-теоретический анализ рациональных (или оптимальных) режимов орошения слитка в зоне вторичного охлаждения.

В качестве исходных требований принимались три основных условия обеспечения оптимального режима охлаждения непрерывных слитков: монотонное снижение температуры поверхности по высоте слитка; равномерное распределение температур по периметру слитка; обеспечение температуры поверхности в конце зоны вторичного охлаждения не ниже $800 \div 900^\circ\text{C}$.

В литературе известны некоторые расчеты, в которых рассматривалось равномерное поле температур по периметру слитка, начиная со времени его пребывания в кристаллизаторе. Однако результаты экспериментов показывают, что для слитков прямоугольного сечения практически невозможно получить равномерное поле температур в кристаллизаторе.

В связи с этим одной из особенностей данного расчета было использование заранее неравномерного распределения температур по периметру, получаемому при непосредственном выходе слитка из кристаллизатора. Характер неравномерности температурного поля оценивался на основе опытных данных.

Затем накладывалось требование, по которому температурное поле на поверхности слитка постепенно выравнивалось как по периметру, так и по высоте слитка при дальнейшем охлаждении в брусьевых и ролико-форсуночных секциях ЗВО, причем в конце ЗВО температура поверхности становилась одинаковой по периметру (800°C). Выравнивание температур происходило монотонно на протяжении всей ЗВО.

Для кристаллизатора задавались граничные условия 3-го рода, а в зоне вторичного охлаждения принимались граничные условия 1-го рода, описывающие закон изменения температуры поверхности:

$$t_{i,j} = t_{i,j}^0 / (h - h_k + 1)^n i, j,$$

где $n_{i,j} = \frac{\ln(t_{i,j}^0 / 800)}{\ln(H - h_k + 1)}$; H – полная высота слитка, отсчитываемая от

мениска в кристаллизаторе до конца зоны вторичного охлаждения; h – текущая высота слитка, отсчитываемая от мениска; h_k – рабочая высота кристаллизатора; $t_{i,j}$ и $t_{i,j}^0$ – температура поверхности слитка соответ-

ственно при текущем значении h и при $h = h_k$; i и j – номера узлов сетки соответственно по поверхности широкой и узкой граней. Для широкой грани $j = 0$; $i = 1, 2, \dots, 59$; для узкой $i = 0$; $j = 1, 2, \dots, 10$.

Программа расчета предусматривала получение распределения температуры по поперечному сечению слитка, тепловых потоков по периметру, толщины корочки по широкой и узкой граням, местных значений коэффициентов теплоотдачи по периметру слитка, среднеинтегральных коэффициентов теплоотдачи по поверхности широкой и узкой граней для каждой секции вторичного охлаждения, удельных и полных расходов воды на каждую секцию.

Связь между средним коэффициентом теплоотдачи и удельным расходом воды в зависимости от вида охлаждения (форсуночно-брюсовое или ролико-форсуночное) находилась по рекомендациям А. Д. Акименко и др.

Рис. 40 иллюстрирует плавное уменьшение неравномерности распределения температур по широкой грани слитка и монотонное снижение тем-

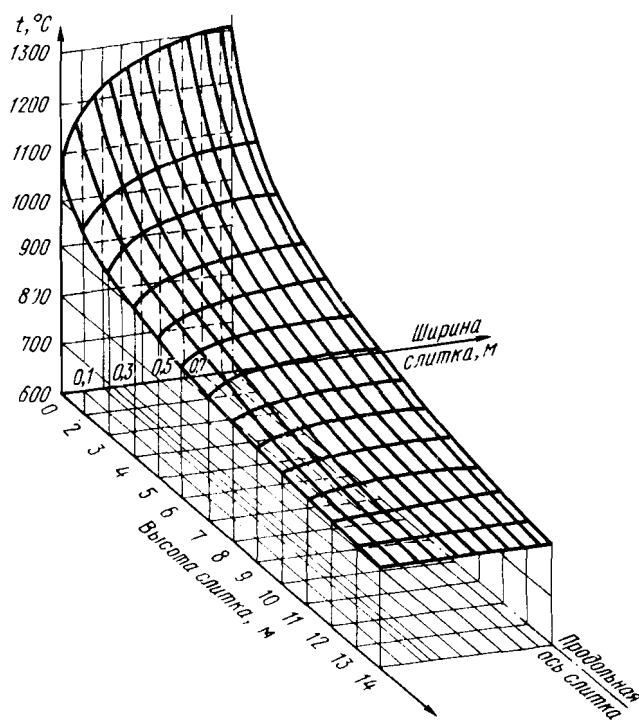


Рис. 40. Изменение температуры поверхности слитка

пературы поверхности по длине зоны вторичного охлаждения. Расчетные кривые соответствуют скорости вытягивания слитка 0,7 м/мин и температуре разливки 1535°C. Расходы воды в расчете на одну широкую грань слитка по секциям зоны вторичного охлаждения сопоставлялись с расходами воды по технологической инструкции НЛМК.

Сравнение полученных результатов с рекомендуемыми заводской технологической инструкцией показывает, что для обеспечения организации рационального режима охлаждения в ЗВО необходимо для всех скоростей разливки более плавное изменение расхода воды по секциям, чем предусмотрено в технологической инструкции. Так, в первой секции необходимо снижение расхода воды на 17÷26 % (в зависимости от скорости разливки). Во второй и третьей секциях расчетные значения выше, чем в инструкции и т.д.

Расчеты также показали, что охлаждение узких граней нецелесообразно для скорости разливки 0,4 м/мин. При скоростях 0,55 и 0,7 м/мин необходимые расходы воды на одну узкую грань в первой секции составили соответственно $0,058 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ и $0,106 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$.

На основании расчетных данных была проведена соответствующая корректировка и наладка рекомендуемых режимов. Таким образом, на основе математической модели затвердевания и охлаждения непрерывного слитка была разработана методика и проведены расчеты по определению рациональных режимов охлаждения во вторичной зоне МНЛЗ. Эти режимы обеспечивают снижение неравномерности температурного поля по периметру слитка при его движении вдоль зоны вторичного охлаждения при температуре поверхности 800°C в конце ЗВО. Их реализация создает предпосылки для уменьшения вероятности образования трещин и, следовательно, повышения качества непрерывных слитков.

Пример 3. Для условий вертикальных МНЛЗ проводился расчетный анализ затвердевания непрерывного слитка с учетом локальной неравномерности охлаждения.

По результатам экспериментальных исследований известно, что при водяном форсуночном охлаждении высоконагретых поверхностей имеет место крайне неравномерное распределение коэффициента теплоотдачи. Для приближения к реальным условиям тепловой работы ЗВО, а также для анализа напряженного состояния непрерывного слитка необходимо учитывать локальные значения этих коэффициентов в различных зонах на различных участках ЗВО.

Основная трудность при решении подобной задачи заключается в недостаточной изученности механизма теплообмена при форсуночном орошении сильно нагретых вертикальных поверхностей. Распределение локальных коэффициентов теплоотдачи зависит от типа и количества форсунок, их расстояния от поверхности слитка, расхода воды и других факторов. Все это приводит к необходимости задания сложных граничных условий, учитывающих неравномерность распределения α

Вдоль продольной оси слитка выделялись две области для задания граничных условий: кристаллизатор и зона вторичного охлаждения. В кристаллизаторе принимали монотонное снижение коэффициента теплоизлучения от максимального значения вверху до минимального внизу кристаллизатора. Численные значения коэффициентов были приведены в соответствие с экспериментальными данными по теплоотводу с охлаждающей водой.

По способу охлаждения в пределах ЗВО выделяли несколько характерных зон поверхности: охлаждения на воздухе (излучением и конвекцией); экранируемую бруском (контактный теплообмен); натекания струи воды, подаваемой форсункой; орошаемую стекающей водой за пределами действия факела форсунки.

Для первого участка локальное значение суммарного коэффициента теплоотдачи, учитывающего излучение и конвекцию, выражали по формуле: $\alpha_{\Sigma} = 12,4 \exp(0,0024 t_{\Pi})$, где α_{Σ} – локальный коэффициент теплоотдачи; t_{Π} – локальное значение температуры поверхности слитка.

Значение эффективного коэффициента теплоотдачи на втором участке можно задавать по опытным данным, полученным для условий работы реальных МНЛЗ.

На третьем участке форсунки образуют области натекания струй в виде эллипсов. Распределение α в месте натекания струй задавалось в виде экспоненциальной зависимости:

$$\alpha = \alpha_{\infty} / \exp \left[\left(1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} \right) \ln \frac{\alpha_{\infty}}{\alpha_0} \right], \quad (58)$$

где x, y – координаты вдоль горизонтальной и вертикальной осей эллипса; a, b – большая и малая полуоси эллипса.

По этой формуле наибольшее значение α_0 получается в центре, а минимальное α_{∞} – на границе области. По опытным данным некоторых авторов в центре указанных зон локальные коэффициенты теплоотдачи могут достигать значений $\sim 10^4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ и выше. Форма зоны непосредственного воздействия факела форсунки принималась в виде эллипса.

На четвертом участке в районе стекающей жидкости коэффициент теплоотдачи принимался равным α_{∞} . Наличие на охлаждаемой поверхности в четвертой зоне устойчивой буферной паровой или паровоздушной пленки, изолирующей поверхность металла от потока воды, обусловливало сравнительно невысокое значение $\alpha_{\infty} = 175 \div 230 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Описанный подход в задании сложных граничных условий, предложенный Л.И. Урбановичем, следует рассматривать как качественно новый шаг в решении указанной задачи, так как ранее в работах других авторов для каждой секции зоны вторичного охлаждения принимали среднее значение α по эмпирическим зависимостям от удельных расходов воды, что существенно снижало ценность практического применения получаемых решений.

Комбинация выделенных четырех типов участков поверхности охлаждаемого слитка получается весьма сложной. Так, на определенном уровне в первой брусьевой секции карта охлаждаемой поверхности определяется наложением действия факелов трех форсунок, а часть поверхности экранируется брусьями. Для создания эффективной программы задания локальных коэффициентов теплоотдачи был разработан метод разбиения сложной карты охлаждаемой поверхности на ряд более простых карт. Каждая простая карта характеризовала распределение по поверхности слитка участков только одного типа, т.е. рассматривалось действие факела каждой форсунки отдельно, а также часть участка поверхности, экранируемой брусьями. Значение α в каждой точке поверхности находилось путем последовательного формализованного анализа простых карт.

При выборе коэффициента теплоотдачи в каждой данной расчетной точке охлаждаемой поверхности делались вычисления для каждой из простых карт. В областях совпадения действия различных факторов из всех полученных значений α принималось максимальное. Кроме того, зона брусьев исключала воздействие остальных факторов.

Для каждой из вычисленных по технологической карте секций охлаждения вычислялись средненеинтегральные по площади поверхности слитка значения $\bar{\alpha}$. Варьированием значения α_0 в центре зоны действия факела форсунки в уравнении (58) достигалось совпадение средней величины коэффициента теплоотдачи по зоне со средним значением, полученным по эмпирическим зависимостям. Расчеты проведены для условий примера 1.

Результаты расчетов представлены на рис. 41 в виде графиков измене-

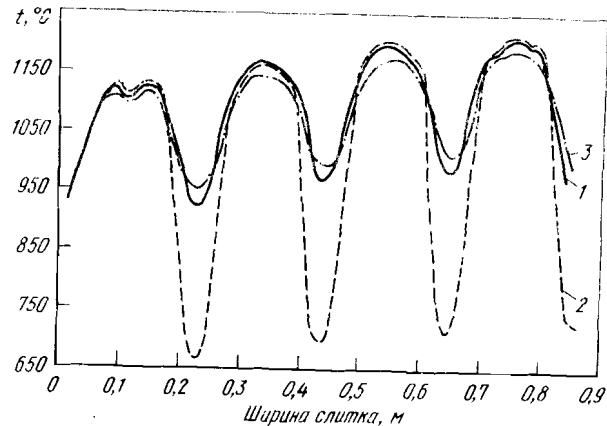


Рис. 41. Распределение температуры поверхности по ширине слитка при уровне от мениска, м: 1 – 1,72; 2 – 2,02; 3 – 2,52

ния температуры при $v = 0,55$ м/мин. Кривые 1 и 3 характеризуют распределение температуры поверхности по ширине слитка соответственно до и после прохождения через четвертый горизонтальный ряд форсунок в первой брусьевой секции. Кривая 2 соответствует нахождению поперечного сечения слитка на уровне центров факелов форсунок того же ряда. Наличие локальных минимумов температур на кривых 1, 2, 3 связано с воздействием форсунок, расположенных в межбрюсовом пространстве. Локальные максимумы на этих кривых соответствуют участкам поверхности, экранированным брусьями. Температура поверхности по ширине слитка на уровне центров факелов форсунок четвертого ряда колеблется в пределах $670 \div 1210^\circ\text{C}$. Влияние геометрии поперечного сечения слитка проявляется в возрастании величины локальных максимумов и минимумов в направлении от угла слитка к центру.

На рис. 42 показано изменение температур по высоте для разных слоев слитка. Значительные колебания температур, вызванные локальной неравномерностью охлаждения, распространяются вглубь слитка и проявляются на глубине до 22 мм от поверхности (кривая 3). Волнооб-

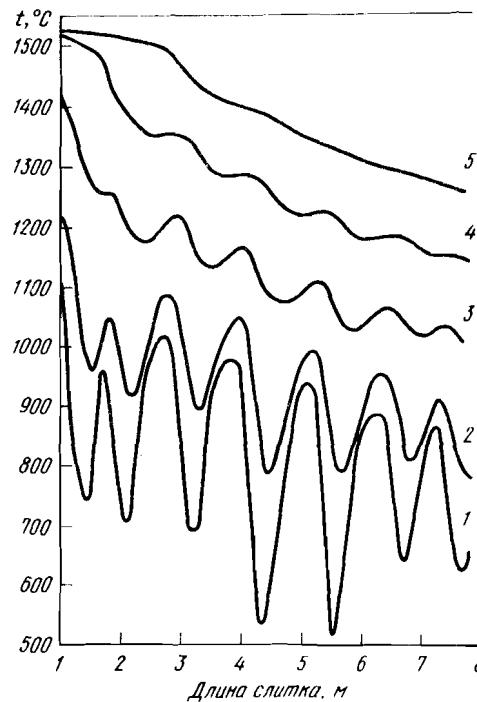


Рис. 42. Изменение температуры на поверхности (1); на глубине 7,5 мм (2); 22,5 мм (3); 37,5 мм (4); 52,5 мм (5) слитка

разный характер изменения температуры поверхности "сглаживается" на глубине от поверхности ~ 40 мм (кривая 4). На поверхности и в слое на глубине 8 мм (кривые 1, 2) величина перепада температур Δt колеблется от 50 до 300°C .

Расчеты показывают, что общий характер изменения температур и локальных коэффициентов теплоотдачи сохраняется и в роликовых секциях. Применение широкофакельных форсунок в роликовых секциях приводит к заметному снижению разности температур поверхности на участках, находившихся в верхних секциях под брусьями и форсунками. Эта разность снижается с 300°C на выходе из третьей брусьевой секции до 10°C и менее на выходе из ЗВО при $v = 0,55$ м/мин.

Проведенные расчеты показали наличие больших перепадов температуры на поверхности слитка и по толщине затвердевающей корки, которые могут явиться причиной появления значительных термических напряжений и возникновения дефектов в непрерывном слитке.

На основании результатов расчетов были разработаны конкретные меры по улучшению схемы расстановки форсунок и способа подачи воды на охлаждаемую поверхность слитка.

Таким образом, разработанная методика расчетно-теоретического исследования процесса затвердевания с учетом локальной неравномерности охлаждения слитка позволяет выявить влияние изменения расположения форсунок с различными углами раскрытия факелов на температурное поле слитка. Практические меры по совершенствованию системы охлаждения в ЗВО способствуют снижению неравномерности распределения температур по сечению слитка, что является предпосылкой для улучшения процесса затвердевания и повышения качества непрерывных слитков.

Пример 4. Для криволинейных МНЛЗ разрабатывались "мягкие" режимы охлаждения непрерывных слитков.

При освоении разливки трубной стали марки 17Г1С на НЛМК поверхность многих слябов была поражена видимыми поперечными трещинами по углу и широкой грани, что связывалось с несовершенством режимов вторичного охлаждения. Анализ работы ЗВО показал, что при существующей расстановке форсунок наиболее характерным является охлаждение углов водой по всей высоте слитка и чрезмерно большое перекрытие факелов в центре широких граней. Охлаждение углов слитка водой происходило также в зоне действия форсунок, установленных по узкой грани. Кроме того, неправильный выбор зависимости расхода воды от скорости разливки приводил к увеличенной плотности орошения в нижних зонах ЗВО по отношению к верхним. Отмеченные недостатки в организации охлаждения в сочетании с большими расходами воды и увеличенной длиной охлаждения приводили к переохлаждению поверхности слитка, особенно его кромок. Это способствовало возникновению и развитию поверхностных дефектов при последующей деформации слитка в

зоне разгиба. В связи с этим возникла необходимость разработки "мягких" режимов охлаждения, обеспечивающих более высокую температуру поверхности слитка в ЗВО.

На основе литературных данных были сформулированы основные требования к "мягкому" режиму охлаждения, который при любых скоростях разливки должен обеспечивать снижение температуры поверхности в верхних секциях ЗВО со скоростью не выше $80^{\circ}\text{C}/\text{м}$; температуру поверхности слитка не ниже $950 \div 1000^{\circ}\text{C}$ в зоне разгиба; минимальный разогрев поверхности слитка (не выше 50°C) при прекращении форсуночного охлаждения.

Кроме того, выполнялись общие условия монотонного снижения температуры поверхности в пределах форсуночного охлаждения; равномерности температуры поверхности слитка по периметру перед зоной разгиба.

Разработанные требования были положены в основу математической модели для расчета режима охлаждения непрерывного слитка в ЗВО криволинейной машины. Задача заключалась в определении расходов воды по секциям ЗВО, которые обеспечивают требуемое распределение температуры по поверхности слитка.

Процессы затвердевания и охлаждения непрерывного слитка в криволинейных МНЛЗ изучались с помощью математической модели, описанной ранее: уравнения (44), (45), (54). Границные условия учитывали особенности охлаждения слитка в криволинейных МНЛЗ.

Для решения поставленной задачи граничные условия задавались в виде монотонно убывающей вдоль технологической оси степенной функции температуры поверхности широких и узких граней слитка:

$$t_{i,j} = t_{i,j}^0 - (t_{i,j}^0 - t_{\text{кон}}) \left(\frac{\tau - \tau_k}{\tau_V - \tau_k} \right)^{1/\gamma}, \quad (59)$$

где $t_{i,j}^0$ — начальное значение температуры; $t_{\text{кон}}$ — конечное значение температуры; τ — текущее время; τ_k — время прохождения кристаллизатора; τ_V — время, за которое температура поверхности становится равной $t_{\text{кон}}$.

Для численного решения системы уравнений использовался метод сеток с применением явной схемы конечно-разностной аппроксимации, квадратной сетки с шагами по координатам $\Delta x = \Delta y = 15,6$ мм и по времени $\Delta \tau = 3,2$ с.

Решение с помощью языка "Фортран-2" проводилось на ЭЦВМ типа "М-222". По специальным подпрограммам проводилось определение среднеинтегральных значений коэффициентов теплоотдачи, ширины орошения и удельного расхода воды в секциях ЗВО.

Расчеты проводились для слитков сечением $0,25 \times (1,29 \div 1,85) \text{ м}^2$ из углеродистой и трубной стали, разливаемых со скоростями 0,6 и 0,8 м/мин, а также для повышенных, еще не освоенных скоростей раз-

ливки $v = 1,0$ и $1,2$ м/мин. На основании проведенных расчетов были получены величины расходов охлаждающей воды по секциям ЗВО.

Из результатов расчетов следует, что "мягкий" режим охлаждения по сравнению с "жестким" характеризуется значительно меньшими расходами воды во всех секциях ЗВО, причем наибольшие различия наблюдаются в последних секциях. Так, при скорости разливки $1,0$ м/мин в 4 и 5-ой секциях расходы воды для стороны малого радиуса должны быть уменьшены соответственно на 53 и $43,5\%$ по сравнению с инструкцией.

Плотность орошения при "мягких" режимах характеризуется плавным уменьшением от максимальных значений $4 \div 7$ м³/(м² · ч) в верхних секциях ЗВО до $0,5 \div 0,7$ м³/(м² · ч) в конце охлаждения соответственно для скоростей $0,6 \div 1,2$ м/мин.

Из рис. 43 следует, что в последних секциях ЗВО наблюдается существенное отличие величин плотности орошения при "мягких" и "жестких"

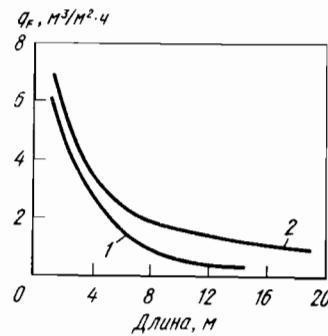


Рис. 43. Изменение плотности орошения при "мягком" (1) и "жестком" (2) режимах

режимах охлаждения. Так, для скорости разливки $1,0$ м/мин оно достигает в последних секциях 67% . "Мягкий" режим охлаждения характеризуется также значительно меньшей протяженностью форсуночного охлаждения. Как следует из рис. 43, эта величина приблизительно на $26,5\%$ меньше, чем при жестком режиме охлаждения.

На рис. 44 представлены результаты расчета температурного поля на стороне r при "мягком" режиме охлаждения для скорости разливки $0,8$ м/мин. Здесь же штрихами нанесены графики для двух характерных точек поверхности при "жестком" режиме охлаждения.

Сравнительный анализ графиков изменения температур по длине слитка показывает, что в случае "мягкого" режима охлаждения уровень температуры широкой грани и углов перед зоной разгиба выше на $120 - 150^\circ\text{C}$. Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными замерами температуры поверхности в зоне разгиба (точки на графике).

Полученные данные были положены в основу при разработке практических рекомендаций и корректировке режимов охлаждения трубных и углеродистых марок сталей на криволинейных МНЛЗ.

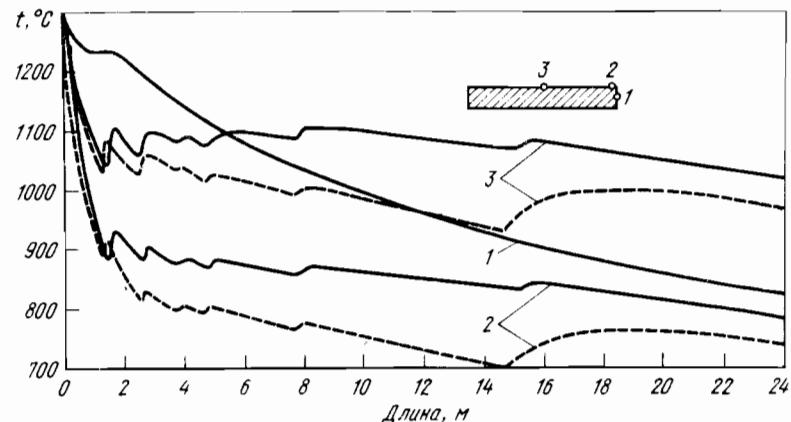


Рис. 44. Изменение температуры поверхности по длине слитка (цифры у кривых – номера точек)

Кроме приведенных примеров, метод математического моделирования использовался для расчетно-теоретического анализа тепловых режимов МНЛЗ при переменной скорости вытягивания слитка, что имеет практическое значение для случаев пуска машины и набора скорости разливки, переходе с плавки на плавку, временного снижения или повышения скорости, аварийной остановки и т.д.

Таким образом, в приведенных примерах показана методика и возможные варианты применения метода математического моделирования для решения конкретных производственных задач.

РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Бойченко М. С., Рутес В. С., Фульмахт В. В. Непрерывная разливка стали. М. Металлургиздат, 1961. с. 252.

Журавлев В. А., Китаев Е. М. Термофизика формирования непрерывного слитка. М., Металлургия, 1974. с. 215.

Непрерывная разливка стали в сортовые заготовки. /Рутес В. С., Гуглин Н. Е., Евтеев Д. П. и др. М. Металлургия, 1967. 144 с.

Непрерывная разливка стали на радиальных установках. /Сладкоштевев В. Т., Потанин Р. В., Суладзе О. Н., Рутес В. С. М. Металлургия, 1974. 286 с.

Оптимизация режимов затвердевания непрерывного слитка. /Берзинь В. А., Жевлаков В. Н., Клявинь Я. Я. и др. Рига, Знатне, 1977. 148 с.

Скворцов А. А., Акименко А. Д. Теплопередача и затвердование стали в установках непрерывной разливки. М. Металлургия, 1966. 190 с.

Теория непрерывной разливки стали (технологические основы). /Рутес В. С., Аскольдов В. И., Евтеев Д. П. и др. М. Металлургия, 1971. 296 с.

Тепловые процессы при непрерывном литье стали. /Самойлович Ю. А., Крулевецкий С. А., Горяинов В. А., Кабаков З. К. М. Металлургия, 1982. 152 с.

Учебное пособие

Вячеслав Андреевич Емельянов

ТЕПЛОВАЯ РАБОТА МАШИН НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОВОК

Редактор издательства Н. Н. Машина
Художественный редактор А. А. Якубенко
Технический редактор Е. К. Астафьевна
Корректоры В.А.Стоянова, В.С.Колганова

ИБ № 3311
Подписано в печать 17.11.87. Т - 19796 Формат бумаги 60 × 90 1/16
Бумага офсетная № 2 Печать офсетная Усл.печ.л. 9,0 Усл. кр.-отт. 9,25
Уч.-изд.л. 9,63 Тираж 3420 экз. Заказ 3979 Цена 30 к. Изд. № 1567

Набрано в издательстве "Металлургия"
на НПТ оператором И.В.Витте

Ордена Трудового Красного Знамени
издательство "Металлургия", 119857, ГСП, Москва, Г-34,
2-й Обыденский пер., д. 14

Московская типография № 9 НПО "Всесоюзная Книжная палата"
при Государственном комитете СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
109033, г. Москва, Волочаевская ул., д. 40