

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования

**«Национальный исследовательский технологический университет  
«МИСиС»**

**НОВОТРОИЦКИЙ ФИЛИАЛ**

Кафедра металлургических технологий

**Шаповалов А.Н.**

# **РАЗЛИВКА И КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ СТАЛИ**

## **ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

по дисциплинам

«Разливка стали и специальная металлургия»,  
«Теория и технология разливки стали»

Направление подготовки: 150400 «Металлургия»

Профиль 1 «Металлургия черных металлов»

Квалификация (степень) выпускника: Бакалавр

Форма обучения: очная, заочная

Новотроицк 2014

УДК 669.18  
ББК 34.327  
Ш 24

**Рецензенты:**

*Профессор кафедры металлургии стали и ферросплавов НИТУ «МИСиС»,  
д.т.н. Явойский А.В.*

*Заведующий кафедрой металлургических технологий Новотроицкого филиала  
ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический  
университет «МИСиС»», к.т.н., доцент Е.В. Братковский*

Шаповалов А.Н. Разливка и кристаллизация стали: Лабораторный практикум. – Новотроицк: НФ НИТУ «МИСиС», 2014. – 68с.

Лабораторный практикум по дисциплинам «Разливка стали и специальная металлургия» и «Теория и технология разливки стали» предназначен для изучения основных технологических процессов происходящих при разливке стали и ее кристаллизации при различных вариантах технологии.

Рассмотрена методика проведения лабораторных работ, теоретические основы изучаемых вопросов, приведены требования к оформлению отчетов и вопросы для самопроверки.

Лабораторный практикум составлен в соответствии с требованиями ФГОС ВПО подготовки бакалавров направления 150400 «Металлургия», обучающихся по всем профилям, реализованным в НФ НИТУ «МИСиС».

*Рекомендовано Методическим советом НФ НИТУ «МИСиС».*

© Новотроицкий филиал  
ФГАОУ ВПО «Национальный  
исследовательский  
технологический университет  
«МИСиС», 2014

## Содержание

Введение .....	4
Порядок выполнения, оформления и защиты лабораторных работ.....	5
Лабораторная работа 1. Исследование динамики затвердевания стального слитка.....	6
Лабораторная работа 2. Изучение усадочных процессов при кристаллизации стали в изложницах.....	12
Лабораторная работа 3. Изучение дефектов стального слитка .....	19
Лабораторная работа 4. Моделирование непрерывной разливки стали .....	31
Лабораторная работа 5. Исследование условий охлаждения непрерывнолитой заготовки в ЗВО .....	43
Лабораторная работа 6. Изучение дефектов непрерывнолитой заготовки.....	55
Библиографический список.....	67

## Введение

Лабораторный практикум предназначен для проведения лабораторных работ по дисциплинам «Разливка стали и специальная металлургия» и «Теория и технология разливки стали» для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 150400 «Металлургия» очной формы обучения.

В практикум включены шесть лабораторных работ, тематика которых охватывает все разделы изучаемых дисциплин. Работы № 1-3, 5 и 6 проводятся в металлургической лаборатории по форме «Групповые работы», а № 4 – в компьютерном классе по форме «Компьютерные имитаторы».

При выполнении представленных в практикуме лабораторных работ, предусмотренных учебным планом подготовки бакалавров по направлению 150400 для дисциплин «Теория и технология производства стали» и «Основы сталеплавильного производства», студенты приобретают компетенции:

- **ОК-4** – самостоятельно приобретать новые знания, используя современные образовательные и информационные технологии;
- **ПК-10** – уметь осуществлять и корректировать технологические процессы в металлургии и материалообработке;
- **ПК-19** – уметь выбирать методы исследования, планировать и проводить необходимые эксперименты, интерпретировать результаты и делать выводы;
- **ПСК-6-МЧМ** – анализировать, совершенствовать и разрабатывать нормативную и технологическую документацию металлургического производства.

Большинство лабораторных работ являются, по существу, небольшими исследованиями, поэтому для их проведения, обработки полученных данных требуется необходимая теоретическая подготовка и активное творческое участие студентов.

## **Порядок выполнения, оформления и защиты лабораторных работ**

В лабораториях и компьютерных классах НФ НИТУ «МИСиС» находится оборудование, позволяющее изучать строение стальных слитков и моделировать процессы разливки и кристаллизации стали.

Все лабораторные работы выполняются бригадами студентов. В целях экономии времени персоналом лаборатории могут быть выполнены вспомогательные операции. Предпочтительно последовательное выполнение лабораторных работ в соответствии с содержанием практикума.

На первом лабораторном занятии преподаватель должен ознакомить студентов с задачами лабораторного практикума, требованиями, предъявляемыми к отчетам, правилами внутреннего распорядка лаборатории. В ряде случаев преподаватель должен напомнить студентам некоторые теоретические сведения, непосредственно относящиеся к той или иной работе, либо организовать показ тех или иных операций.

После вводной беседы преподаватель знакомит студентов с правилами техники безопасности, что фиксируется в специальном журнале.

Приступая к выполнению работы, студент должен изучить ее описание, ознакомиться с рекомендованной литературой и составить конспект с указанием цели работы, теоретического введения, технологических параметров основных процессов, схем установок и приборов.

В начале каждого лабораторного занятия студенты должны защитить отчет по предыдущей работе и получить допуск к выполнению следующей работы.

После окончания каждой работы студенты предъявляют преподавателю на подпись результаты опытов и наводят порядок на рабочем месте.

По каждой лабораторной работе оформляется отчет, который должен начинаться с названия работы и содержать следующие разделы: цель работы, краткое теоретическое введение, методика проведения работы, схемы и описание лабораторных установок, результаты измерений, расчетов и выводы. Индивидуальные требования по оформлению отчетов изложены в описании представленных в практикуме лабораторных работ.

Защищенные лабораторные работы являются допуском к итоговому виду аттестации по дисциплинам «Разливка стали и специальная металлургия» и «Теория и технология разливки стали».

# Лабораторная работа 1. Исследование динамики затвердевания стального слитка

## 1 Цель работы

- изучение последовательности затвердевания различных частей слитка;
- изучение механизма формирования кристаллических зон;
- исследование изменения толщины слоя затвердевшего металла и скорости его затвердевания во времени.

## 2 Теоретическое введение

Кристаллизация – это процесс фазового превращения жидкого расплава в сросшиеся друг с другом твёрдые кристаллы. Кристаллизация стабильно протекает только при наличии в расплаве переохлаждения, то есть когда температура расплава ниже температуры начала кристаллизации – температуры ликвидус. По современным представлениям о механизме кристаллизации процесс формирования любого кристалла имеет две стадии развития. Первая стадия – образование в переохлаждённом расплаве небольшого по размерам зародыша кристалла – центра кристаллизации. На второй стадии происходит рост центра кристаллизации до кристалла макроскопического размера.

Форма и размер кристаллов зависят от соотношения двух скоростей:

- скорости зарождения центров кристаллизации  $V_{зц}$  (характеризует количество центров кристаллизации, возникающих в единице объёма расплава за единицу времени);
- линейной скорости роста кристаллов  $V_{рк}$  (характеризует увеличение линейных размеров кристалла в единицу времени).

Обе эти скорости, в свою очередь, зависят от величины переохлаждения расплава (рисунок 1.1).

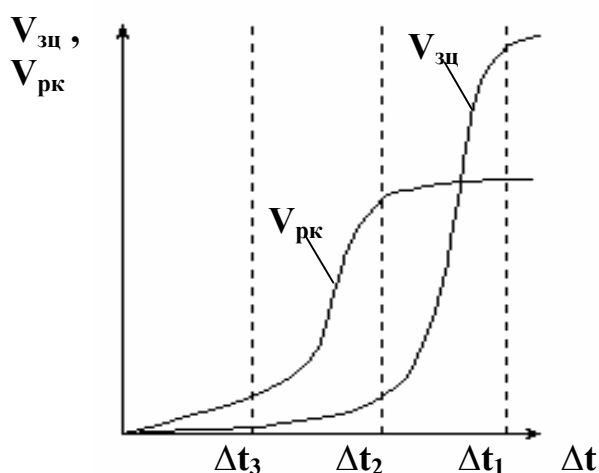


Рисунок 1.1 – Зависимость скорости зарождения центров кристаллизации ( $V_{зц}$ ) и линейной скорости роста кристаллов ( $V_{рк}$ ) от величины переохлаждения расплава ( $\Delta t$ )

Наибольшая величина переохлаждения –  $\Delta t_1$  характерна для расплава, непосредственно контактирующего со стенками изложницы. При таком переохлаждении (см. рисунок 1.1) скорость зарождения центров кристаллизации значительно превышает линейную скорость роста кристаллов. Поэтому одновременно зарождается множество кристаллов, вследствие чего затвердевший металл узкой периферийной зоны слитка имеет мелкокристаллическую структуру.

После образования на стенках изложницы слоя затвердевшего металла интенсивность отвода тепла из расплава снижается, что вызывает уменьшение величины переохлаждения расплава около фронта кристаллизации. При меньшем переохлаждении  $\Delta t_2$  скорость зарождения центров кристаллизации резко снижается (см. рисунок 1.1) при сохранении высокой линейной скорости роста кристаллов. В таких условиях быстро растут ранее зародившиеся кристаллы, а новые кристаллы практически не успевают образоваться. Так как тепло в основном отводится через боковые поверхности изложницы, то кристаллы растут преимущественно вглубь слитка в направлении, перпендикулярном его боковой поверхности. Такие кристаллы получили название столбчатых кристаллов (промежуточная часть).

По мере утолщения слоя затвердевшего металла сопротивление отводу тепла возрастает, в результате чего величина переохлаждения снижается. При малом переохлаждении  $\Delta t_3$  резко уменьшается линейная скорость роста кристаллов, которая уже ненамного превышает скорость зарождения центров кристаллизации (см. рисунок 1.1). В этих условиях формируется зона крупных неориентированных в пространстве кристаллов (центральная часть слитка).

В процессе кристаллизации возможно также зарождение кристаллов в объёме расплава, в основном на посторонних включениях. Под действием силы тяжести эти кристаллы медленно опускаются в нижнюю часть слитка, успевая немного подрасти и приобретая форму крупных равноосных кристаллов. Они формируют сужающуюся сверху зону – конус осаждения.

В целом же в классическом стальном слитке имеется четыре кристаллические зоны:

- поверхностная зона мелких равноосных кристаллов;
- зона столбчатых кристаллов;
- зона крупных разориентированных кристаллов;
- зона крупных равноосных кристаллов (конус осаждения).

Толщина затвердевшего слоя металла приближенно определяется условиями и продолжительностью затвердевания из уравнения

$$\xi = k\sqrt{\tau}, \quad (1.1)$$

где  $\xi$  – толщина закристаллизовавшегося металла, мм;

$\tau$  – продолжительность затвердевания, мин;

$k$  – коэффициент затвердевания, зависящий от состава стали и условия затвердевания,  $\text{мм/мин}^{1/2}$ .

### 3 Методика выполнения работы

Работа выполняется в течение двух учебных часов и заключается в наблюдении за кристаллизацией парафина, моделирующего жидкую сталь, в изложнице с двумя прозрачными стенками.

Для проведения работы используется модель плоской изложницы, позволяющая наблюдать затвердевание жидкости и производить необходимые измерения (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Модель плоской прозрачной изложницы

Боковые стенки и днище изложницы изготовлены из стального листа толщиной 20 мм. Передняя и задняя стенки – съемные, из прозрачного малотеплопроводного органического стекла, позволяющего наблюдать процесс кристаллизации жидкости.

До начала работы парафин плавится в специальном обогреваемом ковше, из которого разливается в изложницы сверху с помощью стопорного устройства в течение 0,5-1 минуты. Температура расплава перед заливкой в изложницу должна составлять 55-70 °С. Расплав заливается в изложницу так, чтобы его уровень находился на расстоянии 5-8 мм от верхнего края изложницы.

Для удобства наблюдения за кристаллизацией расплава включается светильник, установленный за изложницей. При проведении наблюдения следует обратить внимание на следующие процессы:



- образование разных кристаллических зон;
- направление движения расплава;
- образование усадочной раковины.

В ходе наблюдения за процессом затвердевания каждые 2 минуты, начиная с момента наполнения изложницы, при помощи линейки производится измерение толщины затвердевшей оболочки в средней части слитка. Результаты измерений заносятся в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Результаты измерений толщины затвердевшей оболочки

№ опыта	Время после наполнения модели изложницы $\tau_M$ , мин	Толщина затвердевшей оболочки $\xi_M$ , мм
1	2	
2	4	
3	6	
...	...	

Измерения динамики затвердевания продолжаются в течение 20-30 минут (10-15 измерений).

## 4 Обработка опытных данных

### 4.1 Пересчет результатов измерений на реальный стальной слиток

В соответствии с теорией подобия результаты измерений на модели необходимо пересчитать на реальный стальной слиток, пользуясь масштабным преобразованием линейных размеров и времени.

Толщина затвердевшего слоя в реальном слитке, соответствующую текущим результатам измерений на модели, находится для каждого опыта из уравнения:

$$\xi_{сл} = \xi_M \cdot \frac{L_{сл}}{L_M}, \quad (1.2)$$

где  $\xi_{сл}, \xi_M$  - толщина слоя затвердевшего металла в слитке и на модели, соответственно, мм;

$L_{сл}, L_M$  – линейный размер реального слитка и модели, соответственно, мм.

В качестве линейного размера можно принять толщину слитка в его подприбыльной части. Линейный размер модели ( $L_M$ ) замеряется непосредственно на модели при помощи линейки. Линейный размер реального стального слитка ( $L_{сл}$ ) выбирается из таблицы 1.2 в соответствии с заданной преподавателем массой слитка.

Таблица 1.2 – Численные значения основных размеров слитка

Масса слитка, т	Размеры слитка, мм*									
	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$	$H_1$	$H_2$
7,04	647	750	520	710	567	670	440	630	470	2055
7,46	804	864	620	810	540	640	370	590	490	1955
8	710	910	599	746	560	710	495	646	485	2060
16,9	1560	1600	1436	1540	634	734	494	654	480	2100

\* - условные обозначения показаны на рисунке 1.3

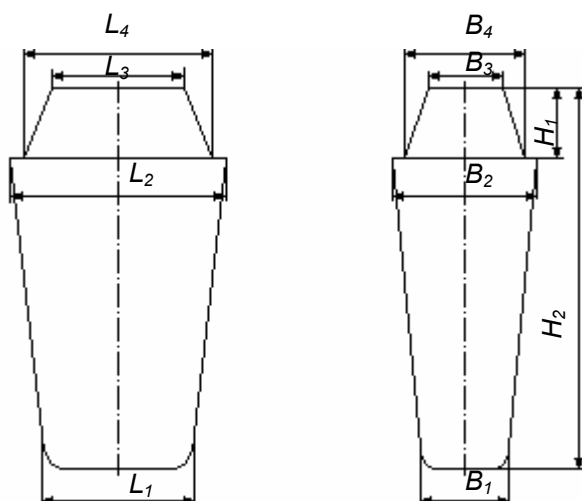


Рисунок 1.3 – Обозначения основных размеров слитка (таблица 1.2)

Время формирования затвердевшего слоя металла, соответствующее измерениям на модели, определяется для каждого опыта из условия равенства чисел Фурье по уравнению:

$$\tau_{\text{сл}} = \tau_{\text{м}} \cdot \frac{\alpha_{\text{м}} \cdot L_{\text{сл}}^2}{\alpha_{\text{сл}} \cdot L_{\text{м}}^2}, \quad (1.3)$$

где  $\tau_{\text{сл}}$ ,  $\tau_{\text{м}}$  – текущее время натуре (слитка) и модели соответственно, мин;  
 $\alpha_{\text{сл}}$ ,  $\alpha_{\text{м}}$  – коэффициент температуропроводности натуре и модели,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Значения коэффициентов температуропроводности для стали –  $6,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ; для парафина –  $8,44 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Результаты пересчёта на реальный стальной слиток заносятся в таблицу 1.3, имеющую следующую форму.

Таблица 1.3 – Результаты пересчёта на стальной слиток массой ... т

№ опыта	Результаты измерений на модели (из таблицы 1.2)		Результаты параметров затвердевания стального слитка			
	$\tau_M$ , мин	$\xi_M$ , мм	Время после наполнения изложницы $\tau_{сл}$ , мин	Толщина слоя затвердевшего металла $\xi_{сл}$ , мм	Произведение $\xi \cdot \sqrt{\tau}$ , мм·мин <sup>0,5</sup>	Скорость затвердевания $v$ , мм/мин
1						
2						
...						
Сумма			$\Sigma\tau$		$\Sigma(\xi \cdot \sqrt{\tau})$	

## 4.2 Обработка результатов

Результаты опытов, пересчитанные на реальный слиток, представляются в виде поля точек на графике зависимости толщины слоя затвердевшего металла  $\xi_{сл}$  от времени после окончания наполнения изложницы  $\tau_{сл}$ . Кроме того, на этом же графике необходимо построить линию аналитической зависимости  $\xi = f(\tau)$ , которая строится по уравнению (1.1) при текущих значениях времени после окончания наполнения изложницы  $\tau_{сл}$  (можно задаваться другими значениями времени, удобными для построения графика).

Коэффициент затвердевания ( $k$ , мм/мин<sup>1/2</sup>) в уравнении (1.1) определяется по данным таблицы 1.3 из уравнения:

$$k = \frac{\Sigma(\xi \cdot \sqrt{\tau})}{\Sigma\tau}. \quad (1.4)$$

В крайний правый столбец таблицы 1.3 заносятся результаты расчёта скорости затвердевания металла, производимого по формуле

$$v = \frac{\Delta\xi}{\Delta\tau}, \quad (1.5)$$

где  $\Delta\tau$  – интервал времени между двумя последовательными замерами, мин;  
 $\Delta\xi$  – прирост толщины слоя затвердевшего металла за интервал времени, мм.

После этого строится график зависимости скорости затвердевания металла  $v$  от времени после окончания наполнения изложницы  $\tau_{сл}$  и делаются выводы по изученным явлениям и закономерностям.

## 5 Контрольные вопросы

- 1 Из каких стадий складывается процесс кристаллизации?
- 2 Какие условия необходимы для начала кристаллизации?
- 3 Как изменяются условия кристаллизации в процессе затвердевания стали?
- 4 Как влияют условия кристаллизации на структуру слитка?
- 5 По какому закону изменяется толщина затвердевшего слоя с течением времени?
- 6 Каков физический смысл и размерность коэффициента затвердевания?
- 7 Как циркулирует расплав в незатвердевшей части слитка? В чём причина такой циркуляции?
- 8 Какой критерий подобия должен использоваться при пересчёте результатов моделирования на реальный слиток?
- 9 Какие масштабные преобразования осуществляются при пересчёте результатов моделирования?
- 10 Какое вещество используется для моделирования кристаллизации стали в лабораторных условиях?

## Лабораторная работа 2. Изучение усадочных процессов при кристаллизации стали в изложницах

### 1 Цель работы

- закрепление знаний по теоретическим основам кристаллизации слитков;
- привитие студентам навыков расчета процессов затвердевания стальных слитков (скорости кристаллизации, усадочных явлений);
- изучение влияния различных технологических факторов на глубину усадочной раковины и выход годного металла.

### 2 Теоретическое введение

Выход годного проката из стальных слитков определяется, в первую очередь, величиной головной обрезки при прокатке их на обжимных станах. Величина головной обрезки во время прокатки слитков спокойной стали зависит от величины и формы усадочной раковины, которая образуется при переходе металла из жидкого состояния в твердое за счет увеличения его плотности.

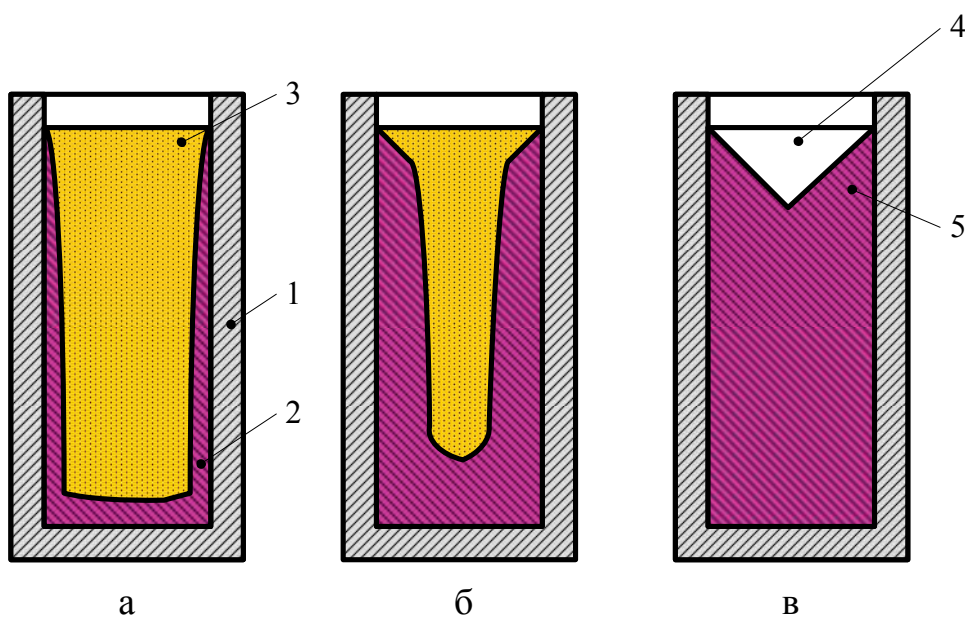
Так, плотность твердого железа при температуре кристаллизации равна 7,33, а жидкого в точке плавления составляет 7,08 т/м<sup>3</sup>. Удельные объемы соответственно равны 0,1364 и 0,1412 м<sup>3</sup>/т, в результате чего при затвердевании стального слитка происходит усадка.

Таким образом, усадкой, стали называется уменьшение объема металла при его затвердевании (переходе из жидкого состояния в твердое). В результате усадки в стальном слитке образуется усадочная раковина.

Усадочной раковинной называется воронкообразное углубление в верхней части слитка. Нередко усадочная раковина закрыта сверху тонкой коркой металла (так называемым "мостом"). При прокатке слитка усадочная раковина деформируется, трансформируясь в осевое нарушение сплошности металла, называемое расслоем. После прокатки головная часть раската с расслоем удаляется в головную обрезь.

Образование данного дефекта неизбежно, поэтому на практике стремятся сконцентрировать усадочную раковину в самой верхней части слитка, чтобы затем с наименьшими потерями удалить ее.

Последовательные стадии формирования усадочной раковины показаны на рисунке 2.1.



1 – изложница; 2 – затвердевшая оболочка; 3 – жидкий металл;  
4 – усадочная раковина; 5 – металл, теряемый с головной обрезью

Рисунок 2.1 – Схема формирования усадочной раковины в начальной (а), промежуточной (б) и конечной (в) стадиях затвердевания слитка

При заливке металла в изложницу около ее стенок образуется слой затвердевшего металла (см. рисунок 2.1, поз. а). В дальнейшем толщина затвердевшей оболочки будет постепенно увеличиваться. Так как затвердевание стали происходит с уменьшением объема, то суммарный объем затвердевшей оболочки и жидкого остатка будет меньше начального объема жидкого металла, залитого в изложницу. Поэтому уровень жидкого металла в изложнице будет постоянно уменьшаться (см. рисунок 2.1, поз. б). В конечном счете, в верхней части полностью затвердевшего слитка образуется углубление – усадочная раковина (см. рисунок 2.1, поз. в).

Абсолютный объем усадочной раковины может быть определен из выражения:

$$V_{ур} = V_{жс} - V_{тс}, \quad (2.1)$$

где  $V_{жс}$  – объем, занимаемый жидкой сталью,  $m^3$ ;  
 $V_{тс}$  – объем, занимаемый сталью после затвердевания,  $m^3$ .  
 Объем ( $V$ ) связан с массой ( $M$ ) соотношением

$$V = M \cdot v_M, \quad (2.2)$$

где  $v_M$  – удельный объем металла,  $m^3/т$ .  
 Тогда уравнение 2.1 преобразуется к виду

$$V_{ур} = V_{жс} - V_{тс} = M_{сл} \cdot v_{жс} - M_{сл} \cdot v_{тс}, \quad (2.3)$$

где  $v_{жс}$ ,  $v_{тс}$  – удельные объемы жидкой и твердой стали соответственно,  $m^3/т$

Расположение и форма усадочной раковины при затвердевании стальных слитков зависит от формы и размеров изложниц, а также способа и технологических параметров разливки стали. Применение изложниц различной конусности, высоты, поперечного размера, расширяющихся кверху или книзу, с прибыльными надставками или без них, с подогревом металла током – все это влияет на выход годного металла и позволяет оптимизировать условия разливки данной марки стали.

При прокатке слитков спокойной стали рядового сортамента головная обрезь обычно составляет 10-16 % от массы слитка, а для качественных сталей достигает 25 %. Широкие пределы колебания головной обрезки связаны с влиянием ряда технологических факторов на формирование усадочной раковины.

Уменьшение объема стали при затвердевании (усадка стали) целиком определяется параметрами металла, залитого в изложницу: его химическим составом и температурой. Усадка углеродистой стали обычно составляет 3-5 %. Объем усадочной раковины пропорционален объему жидкого металла в момент окончания заливки его в изложницу

$$V_{ур} = \frac{\alpha \cdot V_{ж}}{100}, \quad (2.4)$$

где  $V_{ур}$  – относительный объем усадочной раковины, % (объем слитка);  
 $\alpha$  – усадка стали, %  
 $V_{ж}$  – объем жидкой части слитка в момент окончания заливки, %.

Из формулы (2.4) видно, что объем усадочной раковины уменьшается при уменьшении объема металла, находившегося в жидком состоянии в конце наполнения изложницы. Следовательно, объем усадочной раковины будет тем меньше, чем больше металла затвердеет в период наполнения изложницы. Таким образом, относительный объем усадочной раковины зависит от перегрева металла над температурой плавления.

Существенное влияние на глубину усадочной раковины и величину головной обрезки оказывает конфигурация усадочной раковины. Выгодно получить усадочную раковину чашеобразной формы, имеющую большую ширину и малую глубину.

Наиболее эффективный путь уменьшения глубины усадочной раковины состоит в снижении скорости затвердевания металла в верхней части слитка с помощью прибыльных надставок, замедляющих отвод тепла. Определенное влияние может оказать и форма слитка.

Важное значение для практики имеет определение момента полного затвердевания слитка. Толщина затвердевшего слоя металла в изложнице приближенно определяется по формуле (1.1), из которой можно получить уравнение для определения продолжительности затвердевания слитка

$$\tau = \left( \frac{\xi}{k} \right)^2, \quad (2.5)$$

где  $\xi$  – толщина закристаллизовавшегося металла, мм;

$\tau$  – продолжительность затвердевания, мин;

$k$  – коэффициент затвердевания, мм/мин<sup>1/2</sup>.

Слиток полностью затвердеет, когда толщина затвердевшего слоя металла  $\xi$  станет равной половине толщины слитка, то есть  $\xi = a/2$ . Коэффициент затвердевания зависит от теплофизических характеристик: теплоемкость, температуропроводность, теплопроводность и теплота фазового превращения. Для спокойной стали величина коэффициента затвердевания  $k$  изменяется в пределах 24 – 28 мм/мин<sup>1/2</sup> в зависимости от степени перегрева металла.

Изучение процессов кристаллизации на стальных слитках представляет значительную трудность, поскольку требует резки слитков или вырезки образцов из проката. Качественную и количественную оценки процесса затвердевания стального слитка с определенным приближением можно получить на модели.

### 3 Методика выполнения работы

Для моделирования разливки стали используется парафин, имеющий почти одинаковые со сталью относительное изменение удельного объема при переходе из жидкого состояния в твердое. Парафин плавится в специальном обогреваемом ковше, из которого разливается в изложницы сверху и сифоном с помощью стопорного устройства.

Для проведения работы используются разъемные модели, различающиеся формой продольного сечения, соотношением габаритных размеров и утеплением прибыльной части.

Влияние технологических факторов на глубину усадочной раковины и выход годного в данной работе изучается на моделях слитков, отливаемых в стальных разъемных изложницах, установленных на поддонах.

Работа состоит из пяти опытов, каждый из которых рассчитан на одно занятие. Каждый опыт заключается в отливке 2...4 слитков с варьированием одного технологического параметра и последующем изучении строения полученных слитков.

Влияние формы изложниц и утепления прибыльной части на расположение и форму усадочной раковины изучают при наполнении сверху изложниц различной конструкции. Для проверки влияния температуры и скорости разливки наполняют сверху по две изложницы при различной температуре или скорости. Указания по проведению опытов приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Указания по выполнению опытов

№ п/п	Изучаемый технологический фактор	Характеристика изложниц, используемых в опыте*	Температура парафина, °С	Способ заливки	Время заливки, мин.
1	Утепление верхней части слитка	1) УВ, нормальная без надставки 2) УВ, нормальная с металлической надставкой 3) УВ, нормальная с полимерной надставкой	70	Сверху	1,0...1,5
2	Соотношение между высотой и шириной слитка	1) УН, высокая 2) УН, нормальная 3) УН, низкая	70	Сверху	0,5...1,0
3	Характер уширения изложницы (форма изложницы)	1) УВ, нормальная 2) УН, нормальная 3) П, нормальная	70	Сверху	0,5...1,0
4	Скорость разливки (длительность отливки слитка)	1) УН, нормальная 2) УН, нормальная	70	Сверху	0,3...0,5 5...7
6	Температура разливки	1) УН, нормальная 2) УН, нормальная	70 100	Сверху	0,5...1,0

\* УВ - изложница уширенная кверху; УН – уширенная книзу; П – прямая изложница.

Лабораторная работа позволяет выполнить шесть опытов, условия которых представлены в таблице 2.1. На лабораторном занятии студенты выполняют 2 опыта в соответствии с заданием, выдаваемым преподавателем в начале работы.

Получив задание на выполнение работы, необходимо подготовить к заливке набор изложниц. Изложницы, используемые в каждом опыте, указаны в таблице 2.1. Подготовка изложниц заключается в очистке их от остатков парафина, сборке и установке на поддоны.



После подготовки изложниц осуществляют расплавление и нагрев парафина до требуемой температуры в специальном обогреваемом ковше. Затем в присутствии преподавателя производится заливка парафина в изложницы. Рекомендуемое время заливки и температура парафина указаны в таблице 2.1.

После заливки парафина, изложницы выдерживают до полного затвердевания слитка (около 2 ч), после чего (на следующем занятии) слитки извлекаются из изложниц, и распиливаются по вертикальной оси специальной пилой. Внутренне строение слитков эскизируется. На эскизах следует указать основные размеры слитка и глубину усадочной раковины. Пример эскиза приведен на рисунке 2.2.

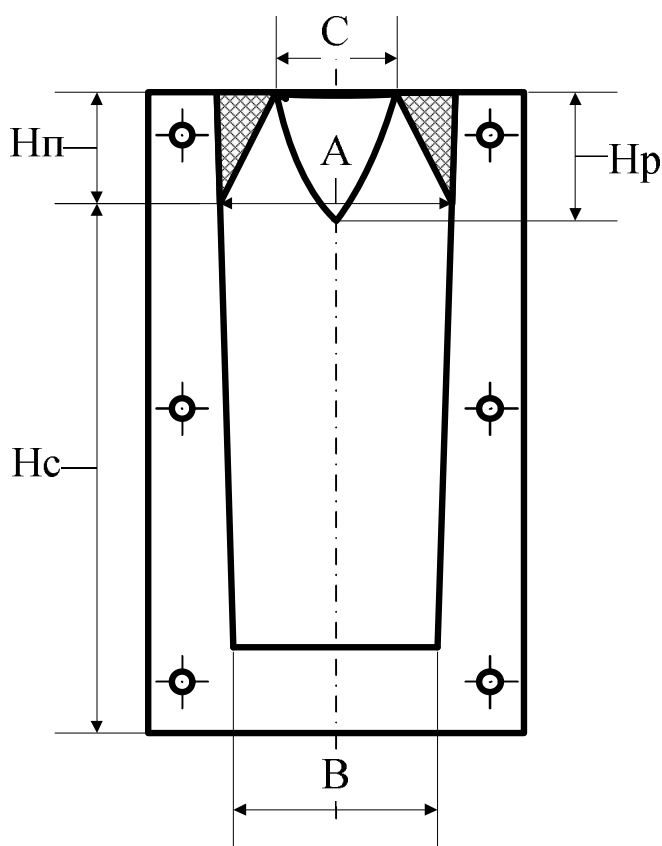


Рисунок 2.2 – Эскиз слитка

Затем, от обеих половинок каждого слитка отпиливается верхняя часть, пораженная усадочной раковинной. При этом длина отпиливаемой части у обеих половинок должна быть одинаковой. После этого взвешивается весь слиток, а также его нижняя часть, не пораженная усадочной раковинной.

#### 4 Обработка опытных данных

По результатам измерений подсчитывается относительная глубина усадочной раковины

$$H_p^{\text{отн}} = \frac{H_p}{H_c + H_{\text{п}}} \cdot 100, \quad \% \quad (2.6)$$

где  $H_p$  – глубина проникновения усадочной раковины в слиток, мм;

$H_c$  – высота основной части слитка, мм;

$H_{\text{п}}$  – высота прибыльной части слитка, мм (см. рисунок 2.2).

Относительный объем усадочной раковины можно определить из выражения

$$V_{\text{отн}} = \frac{V_p}{V_c + V_{\text{п}}} \cdot 100, \quad \% \quad (2.7)$$

где  $V_p$  – объем усадочной раковины (рассчитывается как объем конуса), мм<sup>3</sup>;

$V_c$  – объем основной части слитка (определяется как объем усеченной пирамиды), мм<sup>3</sup>;

$V_{\text{п}}$  – объем прибыли (определяется как объем усеченной пирамиды, мм<sup>3</sup>).

По результатам взвешивания подсчитывается выход годного по уравнению

$$g_r = \frac{M_r}{M_c} \cdot 100, \quad \% \quad (2.8)$$

где  $g_r$  – выход годного, %;

$M_r$  – масса годной части, г;

$M_c$  – масса всего слитка (вместе с прибыльной частью), г.

Данные опыта заносятся в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты опыта

Номер опыта	Характеристика слитков	Высота, мм		Отношение высоты к ширине слитка	Относительный объем усадочной раковины, %	Относительная глубина усадочной раковины, %	Масса, г		Выход годного, %
		Слитка, $H_c$	Усадочной раковины, $H_p$				Слитка	Годной части	

По результатам опытов строятся столбчатые диаграммы зависимости относительной глубины и объема усадочной раковины, а также выхода годного от изучаемого технологического фактора (см. таблицу 2.1). По результатам опыта №2 строится график зависимости вышеназванных переменных от

отношения высоты слитка к его средней ширине, а также формулируются выводы по влиянию изучаемого фактора на показатели разливки.

## **5 Контрольные вопросы**

- 1 Что такое усадочная раковина?
- 2 Причина образования усадочной раковины в стальном слитке
- 3 От чего зависит объем усадочной раковины?
- 4 Место и механизм образования усадочной раковины.
- 5 Факторы, влияющие на величину и форму усадочной раковины.
- 6 Способы уменьшения головной обрезки слитка: конструктивные и технологические.
- 7 Как влияет утепление и обогрев верхней части слитка на относительную глубину усадочной раковины и выход годного? Каков механизм этого влияния?
- 8 Как влияет отношение высоты к ширине слитка на относительную глубину усадочной раковины и выход годного? Каков механизм этого влияния?
- 9 Как влияет уширение слитка на относительную глубину усадочной раковины? Каков механизм этого влияния?
- 10 Как влияет форма усадочной раковины на выход годного металла?
- 11 Как влияет скорость разливки и температура разливаемой жидкости на относительную глубину усадочной раковины и выход годного? Каков механизм этого влияния?
- 12 Как влияет способ разливки на относительную глубину усадочной раковины и выход годного? Каков механизм этого влияния?

## **Лабораторная работа 3. Изучение дефектов стального слитка**

### **1 Цель работы**

- изучение наиболее распространенных дефектов стального слитка, выяснение причин и условий их появления;
- знакомство с мерами по предупреждению и устранению дефектов стального слитка.

### **2 Теоретическое введение**

#### **2.1 Общая характеристика дефектов стального слитка**

Дефектами стального слитка называются такие отклонения от предусмотренного стандартом уровня качества металла, которые существенно ухудшают его служебные свойства и приводят к снижению сортности или отбраковке изделий.

По *причинам возникновения* дефекты стального слитка разделяют на две группы: естественные и технологические. Естественные дефекты неизбежно появляются при затвердевании и охлаждении слитка. К ним относятся усадочная раковина, осевая рыхлость, химическая неоднородность, сотовые пузыри, эндогенные неметаллические включения. Технологические дефекты возникают из-за несовершенства или нарушений технологии выплавки, ковшевой обработки и разливки стали. К таким дефектам относятся трещины, плёны, пояса, заворот корки, подкорковые пузыри в слитках спокойной стали, голенище или рослость слитков кипящей стали, тонкая поверхностная корка в слитке кипящей стали, экзогенные неметаллические включения и другие.

По *месту расположения* все дефекты стального слитка делятся на поверхностные и внутренние.

## 2.2 Характеристика дефектов стального слитка, причин их возникновения и мер по их предупреждению и устранению

Наиболее распространенными **поверхностными** дефектами стального слитка являются поперечные и продольные трещины, плёны, пояса, заворот корки, подкорковые пузыри в слитке спокойной стали, тонкая корка плотного металла в слитке кипящей стали, голенище, рослость слитков, неметаллические включения.

**Поперечные горячие трещины.** Данные трещины, имеющие в большинстве случаев извилистую форму и проходящие в направлении, перпендикулярном к оси слитка (рисунок 3.1, а), образуются в результате препятствия свободной усадке затвердевающего слитка спокойной стали.

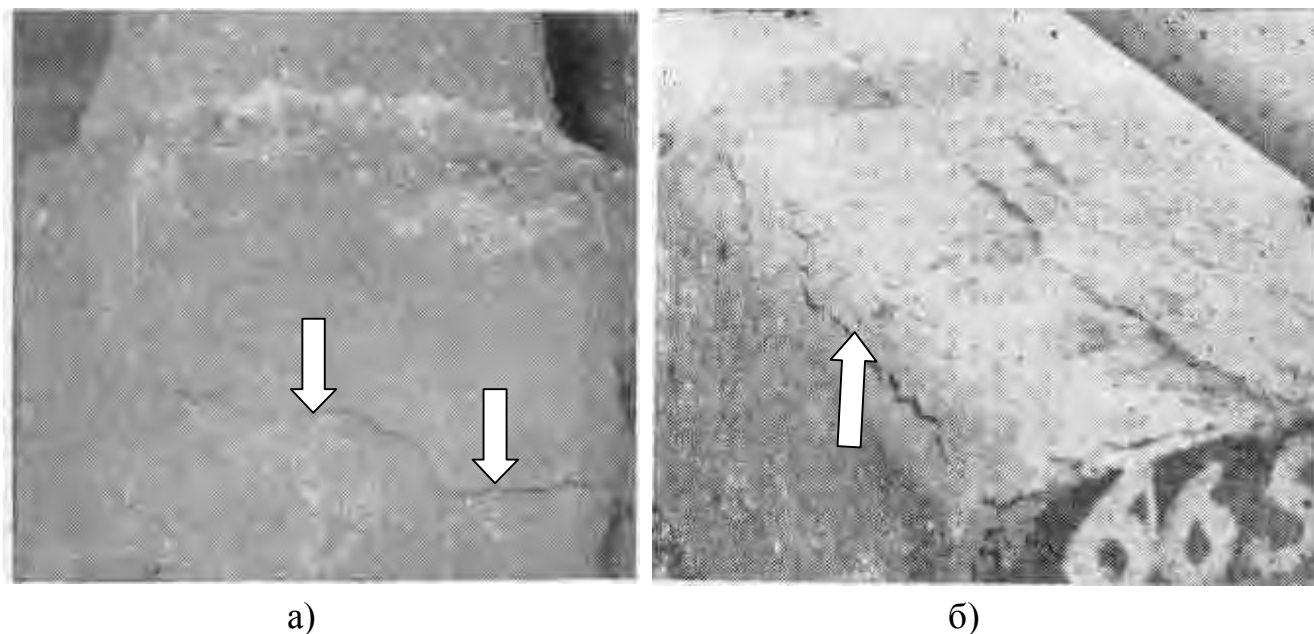


Рисунок 3.1 – Слитки с поперечной (а) и продольной (б) горячими трещинами

Наиболее часто трещины возникают вследствие местного зависания слитка в изложнице. При наличии выбоин, сетки разгара на стенках изложницы или

зазора между изложницей и прибыльной надставкой жидкий металл заполняет эти углубления и застывает в них. Затвердевающий слиток зависает в данном месте, так как его длина уменьшается вследствие усадки стали. Корочка затвердевшего металла может разорваться в месте зависания под действием веса слитка.

Для предупреждения образования поперечных трещин необходимо обеспечивать плотное прилегание прибыльной надставки к изложнице, производить своевременную отбраковку изложниц с дефектными стенками, применять разливку стали под шлаком.

**Продольные горячие трещины.** Трещины, параллельные оси слитка, чаще всего располагаются по ребрам слитка спокойной стали и реже – на его гранях (рисунок 3.1, б). Они имеют ширину 1-3 мм, а длина их достигает 1 м и более. В результате усадки корки затвердевшего металла и теплового расширения изложницы между ними образуется зазор. Жидкий металл оказывается как бы в сосуде, стенками которого является корка затвердевшего металла. Тонкая корка может не выдержать ферростатического давления жидкого металла и разорваться в продольном направлении. Вероятность разрыва возрастает при большом перегреве стали, высокой скорости разливки, плохой центровке струи жидкой стали при разливке сверху. Причинами появления продольных трещин являются высокое содержание серы, низкое (менее 15) отношение  $[Mn] / [S]$ , содержание углерода в интервале 0,15-0,25 %, при котором в стали происходит перитектическое превращение. Наибольшую склонность к трещинообразованию имеют слитки круглого поперечного сечения. Это объясняется медленным нарастанием корки затвердевшего металла вследствие наименьшей площади поверхности теплоотдачи в таких слитках. Чем больше масса слитка, тем выше вероятность образования трещин. Продольные трещины чаще появляются на уширенных кверху слитках легированных сталей. Наименее подвержены трещинообразованию слитки, отливаемые в изложницы прямоугольного сечения с вогнутыми и волнистыми гранями.

**Продольные холодные трещины** – это трещины, идущие от головной или донной части слитка, с незначительным разветвлением (рисунок 3.2).

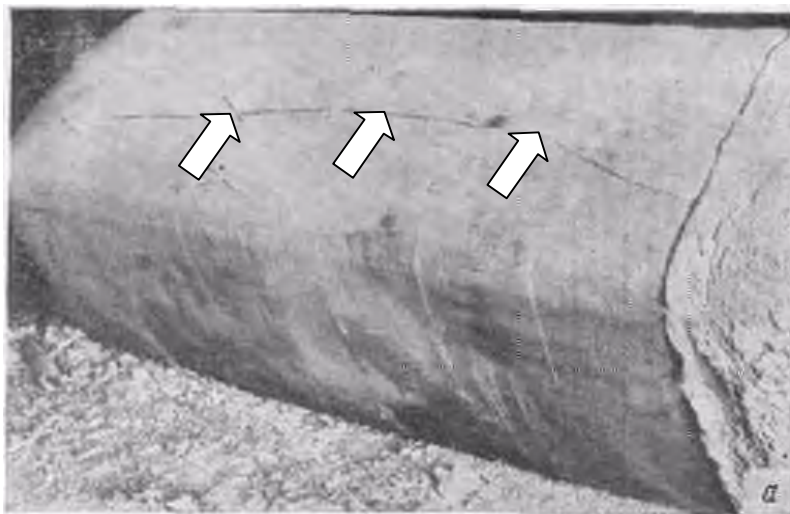


Рисунок 3.2 – Продольная холодная трещина на поверхности слитка

Они образуются в процессе охлаждения затвердевшего слитка на его гранях при температуре ниже 600°C. Склонность стали к появлению холодных трещин возрастает при ее легировании хромом, марганцем, кремнием, а также при содержании углерода в металле более 0,4 %. Причиной образования трещин являются термические и фазовые напряжения при слишком быстром охлаждении слитков. Наиболее действенным средством против возникновения термических трещин является посад слитков в нагревательные колодцы в горячем состоянии.

**Плёны.** Плена – это застывшие наплески металла на поверхности слитка, расположенные, чаще всего, в виде локальных участков (рисунок 3.3, а).

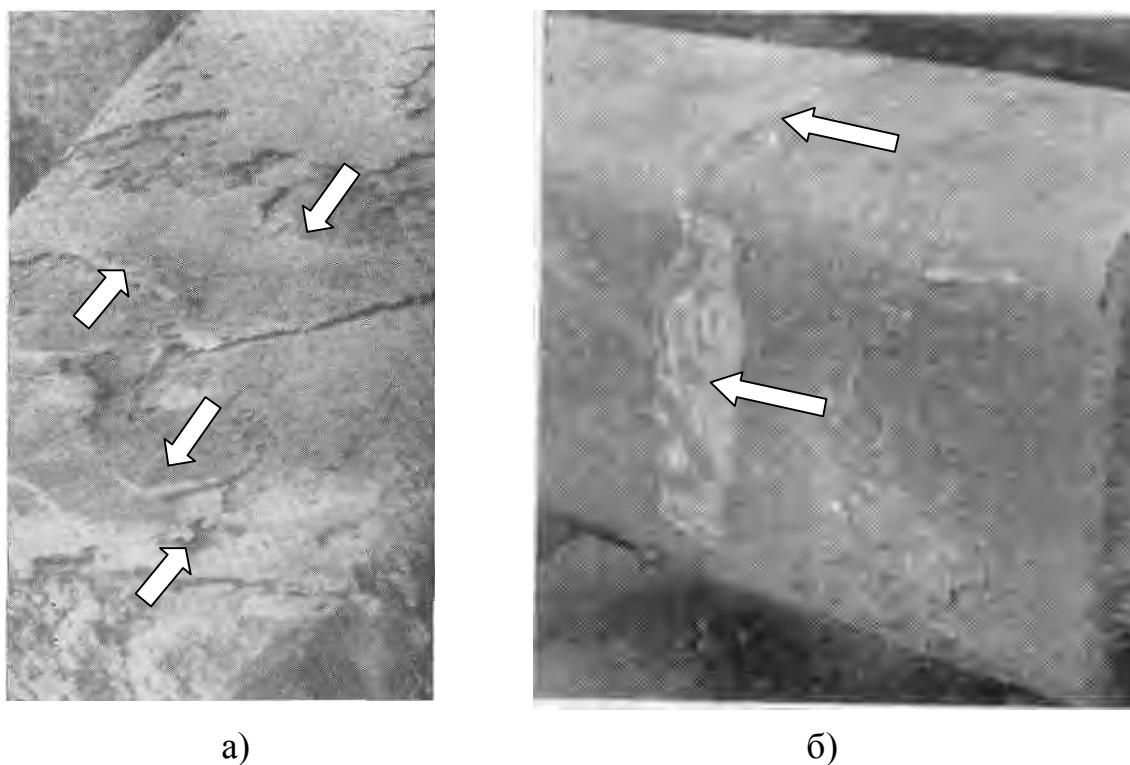


Рисунок 3.3 – Плены (а) и пояс (б) на поверхности слитка

Плёны обычно образуются при разливке стали сверху преимущественно в нижней части слитка. При ударе струи жидкого металла о дно изложницы или поддон сталь разбрызгивается. Поверхность застывших брызг на стенках изложницы окисляется. Поэтому брызги не растворяются поднимающейся жидкой сталью и не свариваются с основной массой слитка ни при разливке, ни при прокатке. Кроме того, причиной образования плён может быть разливка стали веерообразной струей вследствие низкой температуры металла. Для удаления плён поверхность проката из слитков необходимо подвергать огневой зачистке.

С целью уменьшения плёнообразования рекомендуется торможение струи в начале наполнения изложницы, разливка сверху через промежуточный ковш или воронку, применение манжет, разливка металла с оптимальной температурой.

**Пояс.** Пояс представляет собой складку окислевшегося металла по всему периметру слитка (рисунок 3.3, б).

Пояс образуется вследствие перерыва струи при наполнении изложницы сталью. После прекращения подачи жидкого металла в изложницу происходит осадка стали – понижение ее уровня вследствие усадочных процессов при затвердевании. Кромка металла, образовавшаяся по всему периметру слитка, окисляется и не растворится при последующей доливке слитка. Довольно часто в районе пояса на слитках спокойной стали располагаются поперечные трещины. Глубокий пояс может привести к разрушению слитка при его дальнейшей прокатке.

**Заворот корки.** Заворот корки – это приваренные к поверхности слитка куски окисленного металла, затвердевшего до окончания наполнения изложницы, и шлака (рисунок 3.4).

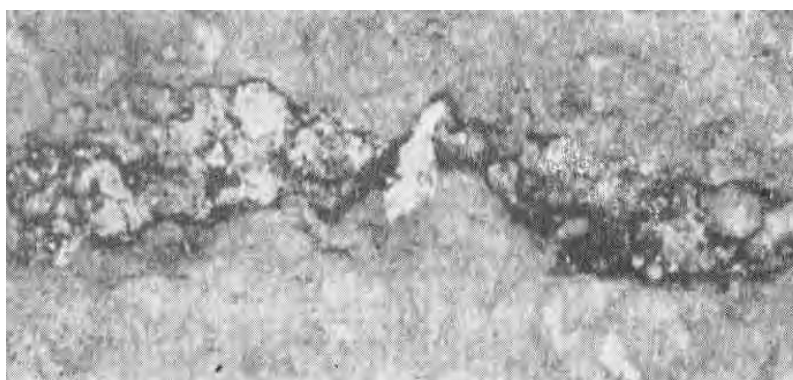


Рисунок 3.4 – Фрагмент поверхности слитка с заворотом корки

Данный дефект образуется преимущественно при сифонной разливке из-за окисления и охлаждения поверхности жидкого металла в изложнице. На поверхности поднимающегося в изложнице металла находится пленка оксидных неметаллических включений вследствие окисления примесей стали кислородом воздуха. Затвердевающий под пленкой металл образует вместе с ней корку, которая поглощает всплывающие из стали включения. Если произойдет приставание корки к стенкам изложницы, то поднимающийся снизу металл прорвет ее по центру, завернет к стенкам изложницы и зальет сверху. В месте заворота корки в слитке обнаруживаются скопления неметаллических включений и газовые пузыри, образующиеся в результате взаимодействия оксидов корки с содержащимся в стали углеродом. Степень пораженности слитков заворотом корки увеличивается при снижении температуры и скорости разливаемого металла, разливке стали с высоким содержанием легкоокисляющихся элементов (алюминия, титана, хрома). Эффективным средством борьбы с заворотами корки является разливка стали под слоем жидкого шлака.

**Подкорковые пузыри.** В слитках спокойной стали встречаются газовые пузыри, расположенные у поверхности слитка, которые иногда могут выходить на его поверхность в виде отверстий округлой формы (рисунок 3.5).

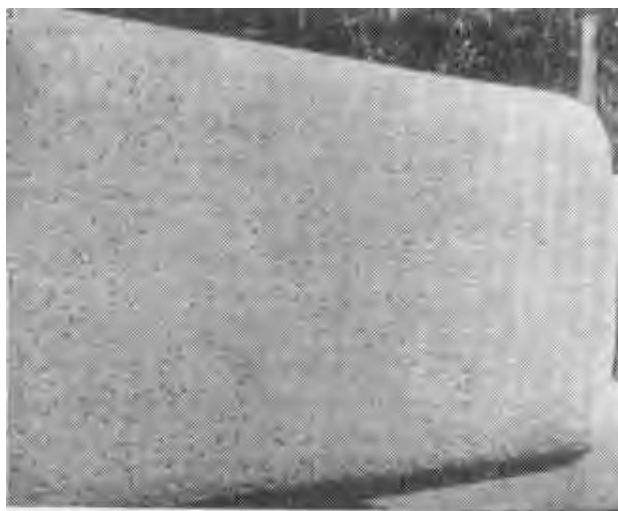


Рисунок 3.5 – Пузыри на поверхности слитка спокойной стали

Причинами возникновения таких пузырей является неравномерный или излишне толстый слой смазки стенок изложницы. В этом случае смазка не успевает выгореть до поднятия уровня жидкого металла и после заливки металлом возгоняется, образуя пузыри. Пузыри образуются и при чрезмерно высоком ( $>0,5\%$ ) содержании влаги в смазке вследствие ее испарения. При прокатке слитков в местах расположения пузырей возникают волосовины – мелкие тонкие трещины.

**Тонкая корка плотного металла в слитке кипящей стали.** Корка плотного металла (рисунок 3.6) отделяет сотовые пузыри от поверхности слитка и предохраняет их от окисления.

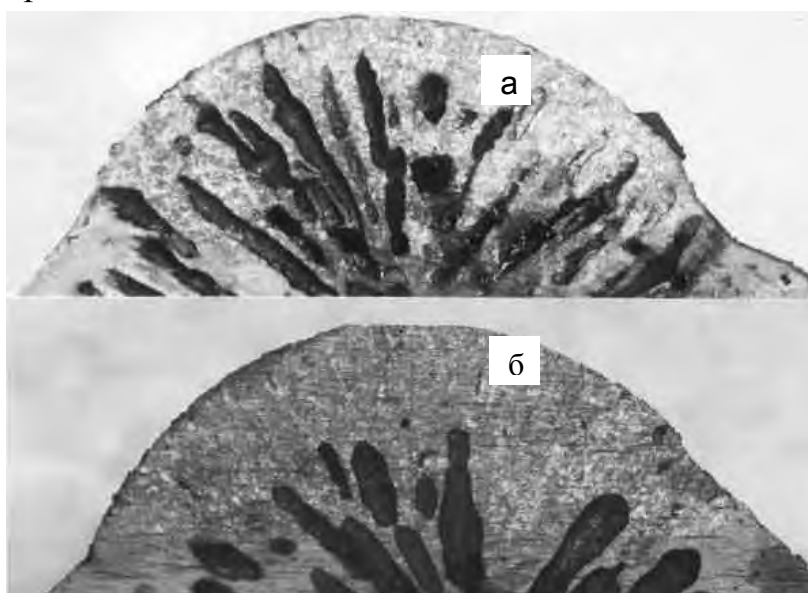


Рисунок 3.6 – Поверхностная корка плотного металла недостаточной (а) и нормальной (б) толщины в угловых пробах из слитков кипящей стали

Толщина корки уменьшается при высокой скорости разливки, разливке перегретого металла, пониженном содержании в кипящей стали растворенного кислорода. В процессе нагрева слитков перед прокаткой в нагревательных



колодцах происходит окисление слитка с его поверхности, в результате чего слой металла определенной толщины превращается в окалину. При наличии в слитке корки недостаточной толщины возможно вскрытие сотовых пузырей и окисление их внутренней поверхности кислородом воздуха. Вследствие этого в процессе прокатки пузыри не завариваются и на поверхности проката образуется дефект – сотовая рвань.

Во избежание появления этого дефекта толщина поверхностной корки в слитках кипящей стали массой до 10 т должна быть не менее 10 мм, а в более крупных слитках – не менее 13-15 мм. Наиболее эффективное воздействие на толщину корки оказывает скорость наполнения изложницы металлом.

**Рослость слитка.** Рослость слитка, обычно, кипящей стали (рисунок 3.7) представляет собой увеличение высоты слитка выше уровня налива жидкого металла в изложнице после окончания ее наполнения.

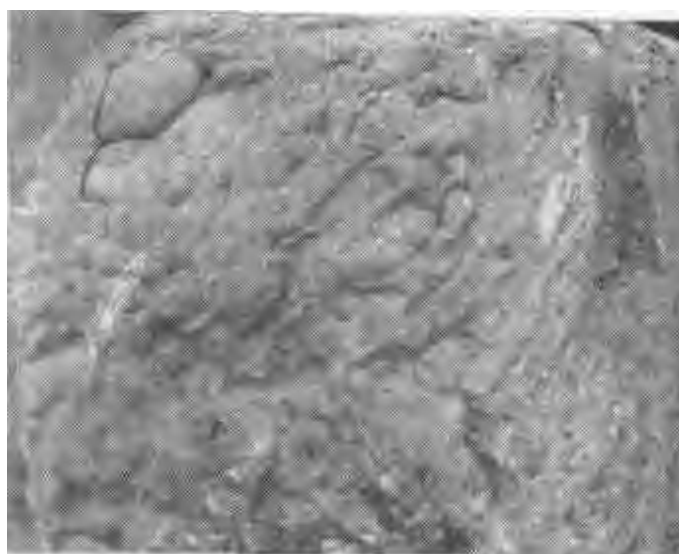


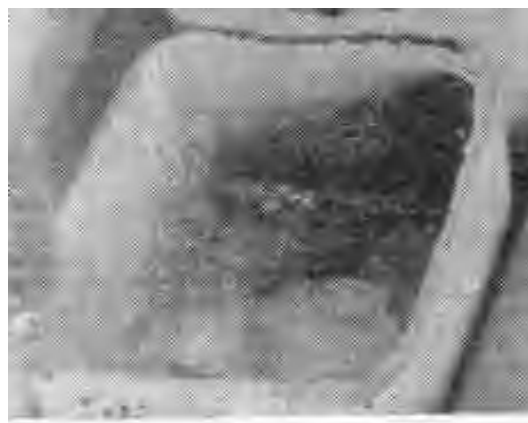
Рисунок 3.7 – Головная часть рослого слитка кипящей стали

Это происходит из-за перераскисленности металла, внешне проявляющейся в вялом кипении металла, вследствие чего в жидкой стали остается много пузырей газа CO, вызывающих увеличение ее объема и рост слитка. В головной части такого слитка имеется большое количество газовых пустот, которые не все завариваются при прокатке. Вследствие этого необходимо увеличение головной обрезки раската. Кроме того, пониженное содержание растворенного в кипящей стали кислорода вызывает уменьшение толщины поверхностной корки плотного металла и появление сотовой рвани на прокате.

**Неметаллические включения.** На поверхности слитка возможны скопления неметаллических включений (рисунок 3.8, а). Данные включения чаще всего имеют экзогенное происхождение: частицы огнеупоров ковша, разливочного припаса при сифонной разливке, сопутствующего шлака. Кроме них могут быть и эндогенные включения, образовавшиеся при раскислении и легировании стали и не полностью из нее удалившиеся.



а)



б)

Рисунок 3.8 – Неметаллические включения на поверхности слитка (а) и голенище (б) в головной части слитка (кипящая сталь)

Для предупреждения данного дефекта необходимо использование качественных огнеупоров при выплавке, ковшевой обработке и разливке стали, особенно, сифонным способом.

Раскисление стали желательно производить комплексными раскислителями, образующими легкоплавкие продукты раскисления. Разливаемая сталь должна иметь регламентированную выдержку в ковше и оптимальный перегрев над температурой ликвидус.

**Голенище.** Голенище – это полая верхняя часть слитка кипящей стали, имеющая тонкую наружную оболочку и открытая сверху (рисунок 3.8, б).

Данный дефект образуется при чрезмерной окисленности кипящей стали, высокой скорости разливки, большом перегреве металла. После окончания наполнения изложницы наблюдается очень бурное кипение, при котором пузырьки газа СО сильно вспенивают металл. После прокипания слитка уровень жидкого металла резко снижается, оставляя на стенках изложницы застывшую корку – голенище.

Во избежание появления данного дефекта необходимо снижать окисленность жидкой стали введением раскислителя – обычно, алюминиевой дроби под струю металла в конце наполнения изложницы, а также осуществлять торможение струи в конце отливки слитка – подтрамбовку металла.

Основными **внутренними** дефектами стального слитка являются усадочная раковина, осевая рыхлость, внутренние трещины, флокены, газовые пузыри в слитке спокойной стали, ликвационный квадрат, пятнистая ликвация, шиферный излом.

**Усадочная раковина.** Усадочная раковина – это воронкообразное углубление в верхней части слитка спокойной стали. Различают открытую и закрытую усадочные раковины (рисунок 3.9).

Образование усадочной раковины происходит вследствие уменьшения объема стали при ее затвердевании. Стенки как открытой, так и закрытой усадочной раковины окисляются кислородом воздуха и покрыты слоем

окалины. Это объясняется тем, что мост металла, закрывающий раковину сверху, как правило, не является сплошным и достаточно толстым и не изолирует ее от атмосферы. Поэтому при прокатке слитков спокойной стали металл в верхней их части не заваривается и происходит его расслоение. При расположении усадочной раковины в прибыльной части слитка величина головной обрезки составляет 12-15 %. Минимальные потери металла с обрезью получаются при чашеобразной форме раковины, имеющей небольшую глубину. Для уменьшения глубины усадочной раковины необходимо разливать металл с небольшим перегревом, производить наполнение прибыльной части слитка неполной струей, увеличивать конусность уширенного кверху слитка при проектировании новой изложницы, эффективно утеплять как боковые грани слитка в прибыльной надставке, так и свободную поверхность – зеркало жидкого металла. С этой целью часто используются экзотермические смеси, обогрев металла газовой горелкой, теплом электрической дуги и другие способы.

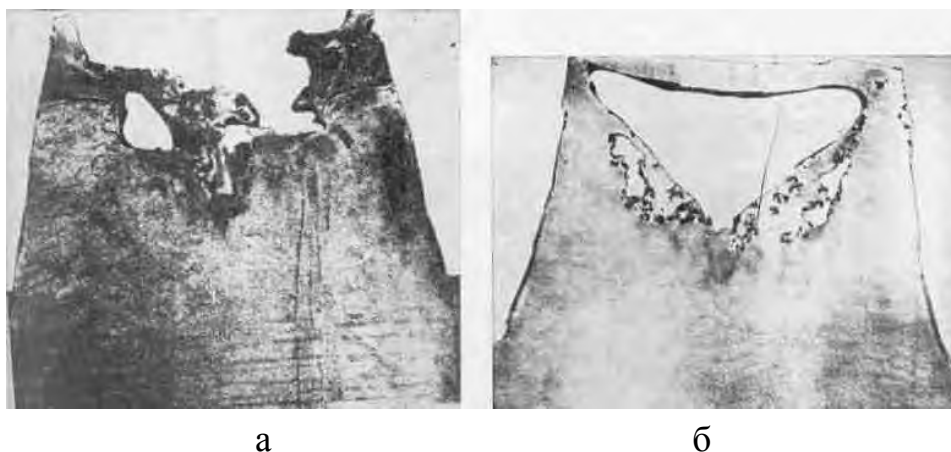


Рисунок 3.9 – Открытая (а) и закрытая (б) усадочные раковины в продольном разрезе уширенных кверху слитков спокойной стали

**Осевая рыхлость.** Она представляет собой усадочные пустоты в осевой части слитка спокойной стали, расположенные ниже усадочной раковины (рисунок 3.10).

Осевая рыхлость также может находиться в нижней половине уширенных кверху слитков спокойной и полуспокойной стали. Образование осевой рыхлости происходит при затвердевании последних порций жидкого металла в условиях недостаточной подпитки жидкой сталью сверху.

Осевая рыхлость обычно заваривается при горячей прокатке, однако, в местах ее расположения наблюдается повышенное содержание примесей, вызывающих ухудшение служебных свойств металла.

Развитию осевой рыхлости способствуют снижение температуры разливаемого металла, увеличение массы слитка, наличие в стали элементов, повышающих усадку при затвердевании (особенно углерода), и увеличивающих вязкость жидкой стали (хрома, титана). Увеличение конусности (до 4 %) уширенного кверху слитка спокойной стали, а также

улучшение утепления и обогрева верхней его части ведет к уменьшению осевой рыхлости.

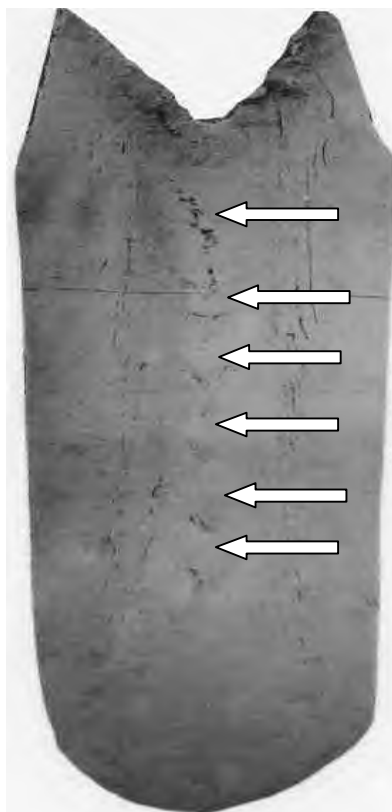
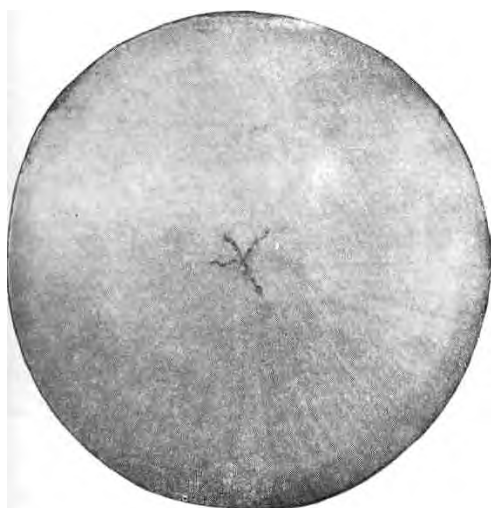


Рисунок 3.10 – Осевая пористость в слитке спокойной стали

**Внутренние трещины.** Внутренние трещины обычно бывают в осевой части слитков легированных сталей (рисунок 3.11, а).



а)



б)

Рисунок 3.11 – Осевая трещина в слитке легированной стали (а) и газовые пузыри в слитке спокойной стали (б)

Они иногда образуются в результате термических напряжений при слишком быстром охлаждении слитка в конце кристаллизации. В прокатанном металле внутренние трещины могут вызывать нарушения сплошности металла в виде расслоений.

Для предупреждения возникновения внутренних трещин необходимо осуществлять горячий посад слитков в колотцы.

**Газовые пузыри в слитке спокойной стали.** В верхней части слитка спокойной стали иногда находятся отдельные газовые пузыри (рисунок 3.11, б).

Причинами их образования являются недостаточная раскисленность стали или повышенное содержание в ней водорода и азота. Раскатанные пузыри обнаруживаются в прокате в виде мелких трещин.

Для предупреждения возникновения газовых пузырей необходимо проводить достаточно полное раскисление металла и снижать газонасыщенность стали.

**Флокены.** Флокены представляют собой тонкие разрывы металла округлой или овальной формы (рисунок 3.12), образующиеся вследствие структурных напряжений в стали с высоким содержанием водорода. Они обычно появляются в деформированном металле и располагаются в средней зоне поперечного сечения поковок или раската.



Рисунок 3.12 – Флокены в прокате из слитка легированной стали

В литом металле флокены встречаются редко, преимущественно в конструкционных сталях с высоким содержанием легирующих элементов (особенно хрома и никеля).

Флокены образуются преимущественно в процессе охлаждения стали после горячей деформации при содержании в металле водорода более  $2\text{ppm}$  ( $2\text{ см}^3/100\text{г}$ ). Флокеночувствительными сталями являются легированные конструкционные и инструментальные, шарикоподшипниковая и некоторые другие.

Для предупреждения образования флокенов необходимо снижать содержание водорода в жидкой стали (барботажа ванны в плавильном агрегате,

прокаливание ферросплавов, вакуумирование, продувка инертным газом), помещать отлитые слитки в вагоны-термосы, проводить специальную термообработку и т.д.

### **3 Методика выполнения работы**

Изучение дефектов стального слитка производится по коллекции образцов с использованием данных методических указаний. Вид изучаемых дефектов указывается преподавателем.

Работа выполняется путем эскизирования дефектов, которое сопровождается их кратким описанием с указанием причин возникновения и мер предупреждения. Эскиз должен выполняться вручную. Ксерокопирование методических указаний **не допускается**.

В отчете по работе, кроме обязательных пунктов, приводятся эскизы изученных дефектов с их кратким описанием и указанием причин возникновения, мер предупреждения

### **4 Контрольные вопросы**

- 1 Что называется дефектом стального слитка?
- 2 Как классифицируются дефекты по причинам их возникновения?
- 3 Какие дефекты слитка относятся к поверхностным?
- 4 Какие дефекты слитка являются внутренними?
- 5 Как выглядит изучаемый дефект?
- 6 Каковы причины возникновения изучаемого дефекта?
- 7 Каковы меры предупреждения образования изучаемого дефекта?

## Лабораторная работа 4. Моделирование непрерывной разливки стали

### 1 Цель работы

- закрепление знаний по теоретическим основам непрерывной разливки стали и конструкции МНЛЗ;
- приобретение навыков управления процессом непрерывной разливки стали на МНЛЗ криволинейного типа;
- приобретение навыков расчета основных параметров непрерывной разливки.

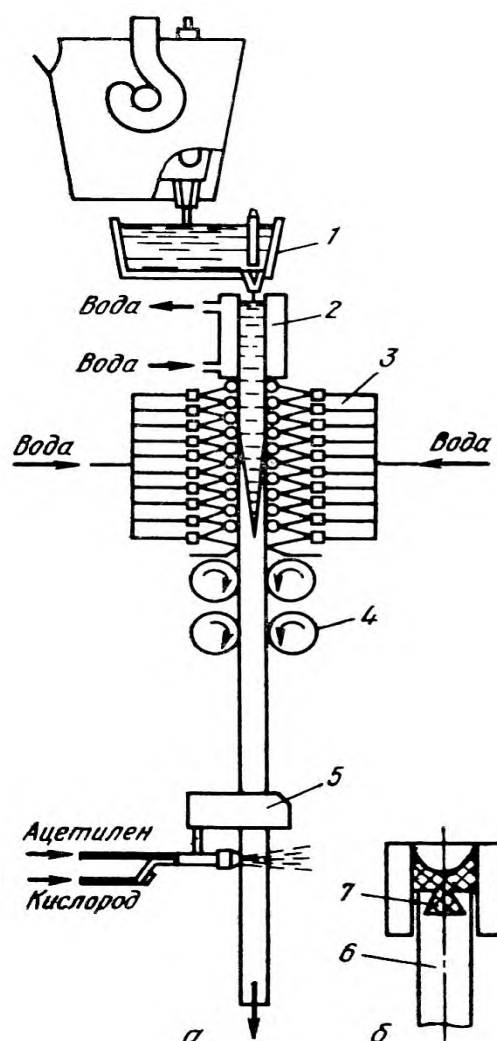
### 2 Теоретическое введение

#### 2.1 Общая характеристика непрерывной разливки стали

Способ непрерывной разливки заключается в том, что жидкую сталь из сталеразливочного ковша через промежуточное устройство (промежуточный ковш) заливают в интенсивно охлаждаемую сквозную форму — кристаллизатор, в котором он начинает затвердевать. Частично затвердевший слиток непрерывно протягивают через него и дополнительно охлаждают в так называемой зоне вторичного охлаждения. В результате в процессе непрерывной заливки металла и его затвердевания образуется непрерывный слиток. В основе процесса непрерывной разливки находится синхронизация скоростей подачи жидкого металла, его кристаллизации и вытягивания слитка.

Агрегаты для разливки стали этим методом называют машинами непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) или установками непрерывной разливки стали (УНРС).

Схема разливки стали на МНЛЗ представлена на рисунке 4.1. Сталь из сталеразливочного ковша поступает в промежуточный ковш, а из него в кристаллизатор. В кристаллизаторе образуется оболочка (корочка), заполненная жидкой сталью по форме и сечению,



- 1- промежуточный ковш;
- 2- кристаллизатор;
- 3- зона вторичного охлаждения;
- 4- тянущая клеть; 5- резка; 6- затравка;
- 7- закристаллизовавшийся металл

Рисунок 4.1 – Схемы разливки стали на МНЛЗ (а) и действие затравки (б)

отвечающему готовой заготовке. Частично затвердевшая заготовка с помощью транспортирующей системы – тянущей клетки поступает в зону вторичного охлаждения, где происходит полное затвердевание заготовок. Затвердевший слиток режется на мерные длины и готовые заготовки и с помощью рольганга или других транспортных средств направляются в прокатный цех или на склад.

При непрерывной разливке различают четыре периода, в течение которых меняются условия затвердевания слитка.

Первый период характеризуется наполнением кристаллизатора и одновременным формированием наружной корки металла в условиях интенсивного теплоотвода. Во время второго периода начинается вытягивание слитка и затвердевание его наружной корки происходит в условиях ее движения, образования воздушного зазора и возрастающего ферростатического давления. При этом часть слитка попадает в зону вторичного охлаждения, где начинается формирование его внутренней структуры.

В третьем периоде процессы кристаллизации протекают при установившемся для каждого сечения по высоте слитка ферростатическом давлении, определяемом глубиной жидкой лунки в условиях постоянного теплоотвода во вторичной зоне охлаждения. Во время четвертого периода прекращается поступление жидкого металла в кристаллизатор и процессы кристаллизации центральных зон слитка протекают при постепенно понижающемся ферростатическом давлении с образованием усадочных дефектов слитка.

Кристаллическая структура непрерывного слитка определяется скоростью разливки, интенсивностью охлаждения и химическим составом металла. Как правило, в непрерывном слитке различаются три зоны кристаллизации: поверхностная - с мелкими разноориентированными кристаллами, столбчатая, а также осевая - с крупными неориентированными кристаллами. Первая зона образуется в верхней части кристаллизатора в условиях интенсивного теплоотвода. Толщина этой зоны колеблется в пределах 4-6 мм, зависит от интенсивности охлаждения, химического состава, температуры перегрева и скорости вытягивания.

Зона столбчатых кристаллов начинает формироваться в условиях замедленного теплоотвода при образовании воздушного зазора между образовавшейся корочкой и стенками кристаллизатора. Размеры этой зоны определяются в первую очередь химическим составом металла и его исходной температурой. Третья зона возникает в условиях дальнейшего снижения интенсивности теплоотвода, имеющего место в центральной части слитка.

Заготовки из непрерывных слитков имеют более однородную кристаллическую структуру, чем обычные слитки. Они также более однородны по химическому составу, так как ликвационные процессы в условиях высоких скоростей кристаллизации не получают такого развития, как в обычных слитках.



## 2.2 Общие закономерности непрерывной разливки стали

Производительность машин непрерывной разливки тесно связана со скоростью разливки. Однако достижение высоких скоростей разливки зависит как от скорости кристаллизации металла, так и размеров кристаллизатора и зоны вторичного охлаждения. Во всех случаях общая длина кристаллизатора и зоны вторичного охлаждения должна быть больше глубины жидкой фазы в отливаемой слитке.

Скорость затвердевания непрерывного слитка определяется условиями его охлаждения и временем нарастания корочки затвердевающего металла. Нарастание затвердевающего слоя в кристаллизаторе описывается уравнением:

$$\xi = k \cdot \sqrt{\frac{\tau_3}{K_\phi}}, \quad (4.1)$$

где  $\xi$  – толщина корочки металла, мм;

$\tau_3$  – продолжительность затвердевания, мин;

$K_\phi$  – коэффициент формы поперечного сечения заготовки (см. раздел 3);

$k$  – коэффициент затвердевания, который для спокойной стали в зависимости от ее состава и условия затвердевания изменяется в пределах 24 – 28 мм/мин<sup>1/2</sup>.

Зная общую высоту металла в кристаллизаторе, можно определить толщину твердой корки на выходе из кристаллизатора в зависимости от скорости разливки:

$$\xi_k = k \sqrt{\frac{H_k}{W}}, \quad (4.2)$$

где  $\xi_k$  – толщина затвердевшего слоя металла на выходе из кристаллизатора, мм;

$W$  – скорость вытягивания слитка, м/мин;

$H_k$  – расстояние от зеркала металла до низа кристаллизатора, м.

Толщина корочки затвердевшего металла на выходе из кристаллизатора является важнейшей величиной, от которой зависят как возможность осуществления самой разливки, так и производительность машины. Во всех случаях прочность корочки должна противостоять напряжениям, возникающим в ней под действием ферростатического давления и температурных градиентов.

Внутри вытягиваемой из кристаллизатора заготовки находится лунка жидкого металла, длина которой определяется по формуле:

$$L_{ж} = \tau_3 \cdot W, \quad (4.3)$$

где  $L_{ж}$  – глубина жидкой лунки, м;

$\tau_3$  – время полного затвердевания слитка, мин.

Обязательным условием получения плотной осевой зоны непрерывнолитой заготовки и безаварийной работы МНЛЗ является соблюдение соотношения

$$\frac{L_{ж}}{L_{м}} \leq 0,9, \quad (4.4)$$

где  $L_{м}$  – металлургическая длина МНЛЗ (расстояние по оси заготовки от уровня жидкого металла в кристаллизаторе до последнего поддерживающего ролика), м.

### 2.3 Параметры непрерывной разливки стали

Основными параметрами непрерывной разливки стали являются температура металла в промежуточном ковше, продолжительность затвердевания заготовки, скорость вытягивания слитка, продолжительность разливки плавки и производительность МНЛЗ и др.

Температура разливаемого металла оказывает существенное влияние на технологию непрерывной разливки и качество получаемой заготовки, поэтому необходимо вести разливку при оптимальном перегреве стали над температурой ликвидус. В зависимости от условий разливки величина оптимального перегрева изменяется от 15-25 °С при разливке плавки закрытой струей в течение до одного часа, до 30-40 °С при разливке плавки открытой струей в течение более одного часа. Температура металла в сталеразливочном ковше должна быть минимальной, но обеспечивать заданный температурный уровень металла в промковше на протяжении разливки всей плавки с учетом теплотерь. Оптимальный перегрев металла в сталеразливочном ковше над температурой в промковше составляет 40-50 °С, поэтому, обычно, температура металла в сталеразливочном ковше на 70-80 °С превышает температуру ликвидус стали.

Продолжительность затвердевания заготовки определяется ее сечением (толщиной  $a$  и шириной  $b$ .) и условиями кристаллизации. С достаточной точностью продолжительность затвердевания заготовки можно определить по формуле

$$\tau_3 = K_{\phi} \cdot \left( \frac{a}{2 \cdot k} \right)^2, \quad (4.5)$$

где  $a$  – толщина заготовки, мм;

$\tau_3$  – продолжительность затвердевания, мин;

$K_{\phi}$  – коэффициент формы поперечного сечения заготовки;

$k$  – коэффициент затвердевания, мм/мин<sup>1/2</sup>.

Значение коэффициента формы  $K_{\phi}$  принимается равным единице при  $b/a \geq 2$ , а при условии  $b/a < 2$ , рассчитывается по формуле:

$$K_{\phi} = 0,5 + 0,25 \cdot b/a. \quad (4.6)$$

Рабочая скорость вытягивания заготовки определяется индивидуально для каждой МНЛЗ, сечения заготовки и марки разливаемой стали таким образом, чтобы обеспечивалось сочетание высокого качества заготовки с достаточно высокой производительностью МНЛЗ. При оптимальных температурных условиях разливки, рабочая скорость вытягивания определяется по уравнению:

$$W_p = k_v \cdot \frac{a + b}{a \cdot b}, \quad (4.7)$$

где  $W_p$  – рабочая скорость вытягивания заготовки, м/мин;

$k_v$  – коэффициент скорости вытягивания, м<sup>2</sup>/мин;

$a, b$  – толщина и ширина заготовки,

Значение коэффициента скорости вытягивания  $k_v$  для слябовых заготовок с отношением  $b/a > 2$ , принимается из диапазона 0,18-0,3 м<sup>2</sup>/мин. Значение коэффициента скорости вытягивания  $k_v$  для блюмовых заготовок (с отношением  $b/a < 2$  и толщиной более 200 мм) принимается из диапазона 0,1-0,14 м<sup>2</sup>/мин, а для сортовых заготовок (толщиной менее 200 мм) – из диапазона 0,2 – 0,3 м<sup>2</sup>/мин. При выборе  $k_v$  следует учитывать, что с увеличением степени легирования стали коэффициент скорости вытягивания необходимо уменьшать.

Длительность разливки плавки зависит от конструкции МНЛЗ (количества ручьев), принятой скорости разливки, массы разливаемого металла и площади поперечного сечения получаемой литой заготовки. Без учета синхронизации работы отделения выплавки и разливки стали длительность разливки плавки (машинное время разливки) можно определить по уравнению

$$\tau_m = \frac{M}{N \cdot \rho_{ст} \cdot F \cdot W_p}, \quad (4.8)$$

где  $\tau_m$  – машинное время разливки (время собственно разливки без учёта ввода затравки, от начала заполнения кристаллизатора до окончания опорожнения ковша), мин;

$M$  – масса стали в сталеразливочном ковше, т;

$N$  – количество ручьев;

$\rho_{ст}$  – плотность затвердевшей стали в конце зоны вторичного охлаждения, т/м<sup>3</sup> (принимается равной 7,6 т/м<sup>3</sup>);

$F$  – площадь поперечного сечения получаемой литой заготовки, м<sup>2</sup>;

$W_p$  – рабочая скорость вытягивания заготовки, м/мин.

Полученное по уравнению (4.8) машинное время разливки не должно превышать допустимых значений, представленных в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Максимально допустимая продолжительность разливки

Емкость сталеразливочного ковша, т	50	100	160	200	300	350	400
Продолжительность разливки, мин	60	75	85	90	110	110	110

При длительности разливки, превышающей допустимые значения, происходит переохлаждение металла в ковше, резко снижается качество литой заготовки, а также возможны аварийные ситуации и даже выход из строя МНЛЗ. Уменьшение продолжительности разливки плавки в этом случае обеспечивается повышением скорости разливки, увеличением количества ручьев или сечения заготовки. Количество ручьев (одновременно отливаемых заготовок) на существующих МНЛЗ колеблется от 1 до 8: 1, 2 или 4 для слябовых МНЛЗ и 2, 4, 6, 8 – для сортовых МНЛЗ.

Годовая производительность МНЛЗ рассчитывается по уравнению:

$$P_{\text{МНЛЗ}} = M \cdot \frac{1440}{1,15 \cdot Z \cdot \left( \tau_m + \frac{\tau_{\text{пс}}}{S} \right) + 1,15 \cdot (100 - Z) \cdot (\tau_m + \tau_{\text{п}})} \cdot g_{\text{г}} \cdot D, \quad (4.9)$$

где  $P_{\text{МНЛЗ}}$  – годовая производительность УНРС, т/год;

1440 - количество минут в сутках;

$Z$  – доля плавов, разливаемых сериями методом «плавка на плавку», %;

$\tau_{\text{пс}}$  – длительность паузы между сериями, мин;

$S$  – среднее количество плавов в одной серии, шт;

$\tau_{\text{п}}$  – длительность паузы между разливкой двух одиночных плавов, мин;

1,15 – коэффициент, учитывающий потерю времени из-за несогласованной работы плавильных агрегатов и УНРС;

$g_{\text{г}}$  – выход годных заготовок, %;

$D$  – число рабочих суток в году, сут.

Доля плавов, разливаемых сериями методом «плавка на плавку» ( $Z$ ), в современных сталеплавильных цехах достигает 90 % и более, а количество плавов в одной серии ( $S$ ) может изменяться от 5-10 до 10 и более.

Выход годных заготовок при непрерывной разливке обычно превышает 95 %. Фактическое время разливки ( $D$ ) по действующим нормативам составляет 291 сут. для слябовых МНЛЗ и 300 сут. для сортовых. Длительность паузы при работе МНЛЗ методом «плавка на плавку» ( $\tau_{\text{пс}}$ ) для слябовых машин составляет 150-180 мин, а для сортовых 80-110 мин. Время подготовки машин к разливке ( $\tau_{\text{пс}}$ ) определяется её конструктивными особенностями. Рекомендуется принимать следующие значения:

- слябовые машины (одно- и двухручьевые) – 160 мин;

- сортовые машины: - четырехручьевые – 95 мин;  
- шестиручьевые – 105 мин.

Подготовка машины после разливки одиночными плавками ( $\tau_{п}$ ) не должна превышать 60 мин., поэтому при разливке одиночных плавков длительность паузы как для слябовых, так и для сортовых МНЛЗ составляет 50-60 мин.

### **3 Методика выполнения работы**

Работа проводится в компьютерном классе с использованием компьютерно-тренинговой системы «Непрерывная разливка стали», предназначенной для обучения студентов НИТУ «МИСиС» навыкам управления процессом непрерывной разливки стали на МНЛЗ криволинейного типа.

Тренажер состоит из трех функциональных модулей по непрерывной разливке стали:

- модуль «Учебник» содержит информацию о конструкции основных механизмов МНЛЗ, технологии непрерывной разливки и качестве непрерывнолитых заготовок, а также процессах, протекающих при непрерывном литье стали;
- модуль «Конструкция» предназначен для изучения основных конструктивных элементов современной МНЛЗ;
- модуль «Тренажер разливщика стали» предназначен для изучения технологии разливки стали на криволинейных слябовых МНЛЗ в различных режимах (в штатном режиме и нештатных производственных ситуациях).

После запуска тренажера «Непрерывная разливка стали» появляется диалоговое окно (рис. 4.2) с функциональными клавишами, позволяющими выбрать один из трех модулей программы: Тренажер разливки, Конструкция, Учебник. На лабораторном занятии необходимо ознакомиться с содержанием каждого модуля и выполнить необходимые задания в соответствии с нижеприведенными методическими указаниями.

#### **3.1 Порядок работы в модуле «Учебник»**

В начале занятия студенты изучают теорию непрерывной разливки стали по материалам, представленным в окне подсистемы "Учебник" обучающей среды. Теоретический материал обучающей среды содержит информацию о конструкции основных механизмов МНЛЗ, технологии непрерывной разливки и качестве непрерывнолитых заготовок, а также процессах, протекающих при непрерывном литье стали.

### 3.2 Порядок работы в модуле «Конструкция»

Завершив изучение теоретического материала (на первом уроке лабораторного занятия) студенты приступают к изучению конструкции основных узлов МНЛЗ в модуле "Конструкция". После запуска модуля "Конструкция", появляется окно программы (рисунок 4.2), разделенное на три поля: управление, просмотр и список.

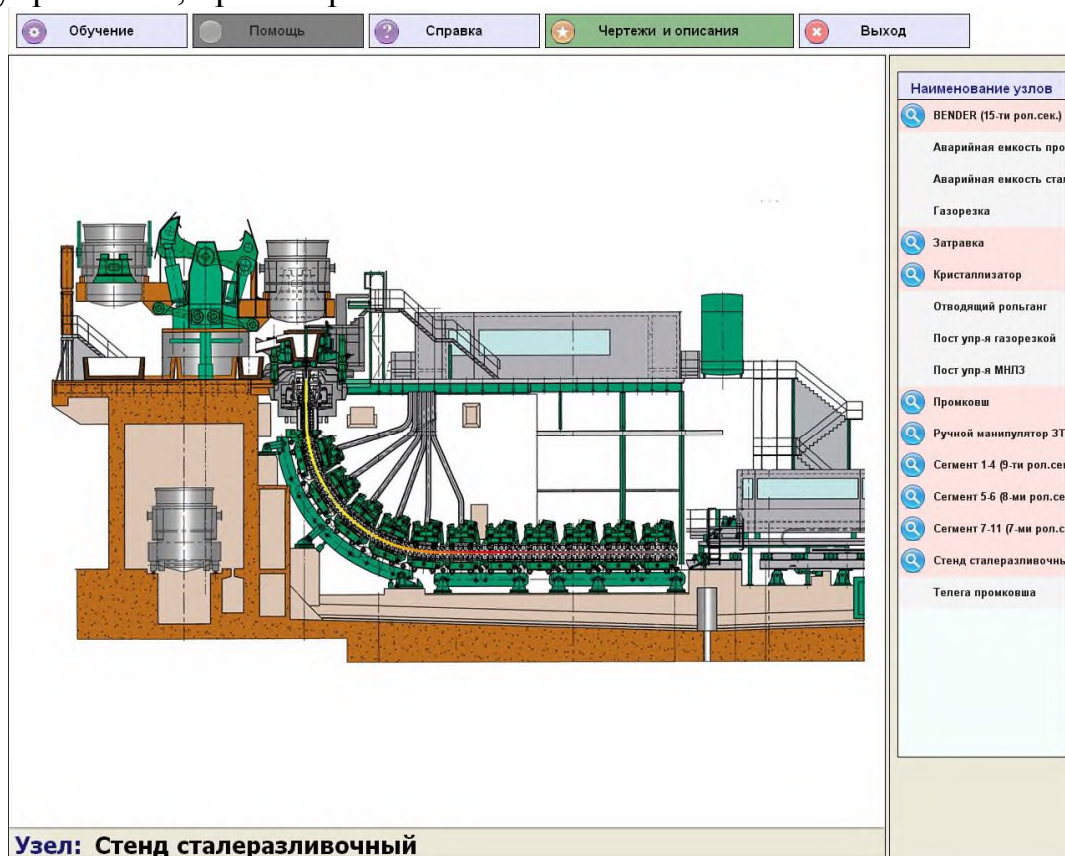


Рисунок 4.2 – Модуль «Конструкция»

Поле управления, на котором находятся кнопки управления, располагается в верхней части окна программы. Кнопка "Обучение/Контроль" переключает режим работы программы. В режиме просмотра обучающийся может свободно просматривать узлы оборудования, а также их увеличенные представления.

Работа с подсистемой происходит посредством списка узлов оборудования, размещенного в правой части экрана и окна обзора. В окне обзора можно одиночными кликами выбирать узлы оборудования, названия которых выделяются в списке. Кликая на название в списке пользователь выбирает узел в окне обзора, где он подсвечивается красным цветом. Если доступно подробное представление - перейти в него можно двойным щелчком как в списке, так и в окне обзора.

Изучение конструкции узлов МНЛЗ проводится по этапам:

- 1) На первом этапе необходимо изучить конструкцию узлов МНЛЗ в режиме "Обучение". В режиме обучения необходимо выполнять задания подсистемы, которые отображаются в нижней части экрана. В этом

режиме доступна функция помощи, которая выделяет на чертеже нужный узел.

- 2) На втором этапе необходимо проверить усвоение материала по конструкции МНЛЗ в режиме "Контроль". В режиме контроля функция помощи недоступна, ведется учет ошибок. Правильно выбранные узлы подсвечиваются зеленым. Неправильно выбранные – красным. Контроль производится по всем узлам оборудования и их увеличенным представлениям.

Изучение конструкции узлов МНЛЗ можно считать завершенным, если в ходе работы с подсистемой в режиме "Контроль" не было выявлено ошибок. Результат по суммарному количеству ошибок выводится при выходе из подсистемы "Конструкция". Усвоение материала модуля «Конструкция» проверяется преподавателем, после чего студенты получают разрешение на выполнение третьей части работы, которая выполняется в модуле «Тренажер разливки».

### **3.3 Порядок работы в модуле «Тренажер разливки»**

Модуль «Тренажер разливки» представляет собой тренинг по технологии разливки стали на криволинейных слябовых МНЛЗ. Работа с модулем проводится в два этапа: обучение и контроль.

В режиме "Обучение" предусмотрено изучение штатных и нештатных сценариев. Штатный режим представляет собой тренинг по технологии разливки стали и непрерывной разливке серии плавок: замена погружного стакана, замена промковша по стойкости, подготовка, выдача концов, разливка, пуск. В сценарии «Разливка» дополнительно реализована математическая модель для прогнозирования дефектов непрерывнолитой заготовки в зависимости от управляющих действий обучаемого.

Нештатный режим представляет тренинг по ликвидации различных нештатных ситуаций связанных с неисправностями, возникающими на участке стальной промковш-промковш-кристаллизатор: перелив кристаллизатора с подвисанием, прогар промковша, не кроет стопор, резкое прекращение подачи металла в кристаллизатор, попадание шлака из промковша в кристаллизатор, прогар стальной промковши.

Для работы с модулем «Тренажер разливки» в режиме «Обучение» необходимо в окне программы (рисунок 4.3) выбрать параметры разливки (тип и вид сценария, группу и марку стали, а также сечение НЛЗ) и нажать кнопку «Начать».

В режиме «Обучение» студенту необходимо выполнить указанные преподавателем сценарии разливки при заданных параметрах разливки (группа и марка стали, сечение заготовки) руководствуясь подсказками обучающей системы, в которой все операции разливки (см. рисунок 4.4) сгруппированы по ручным операциям и сообщениям (реализованы в меню) и по автоматизированным операциям (реализовано в пультах).

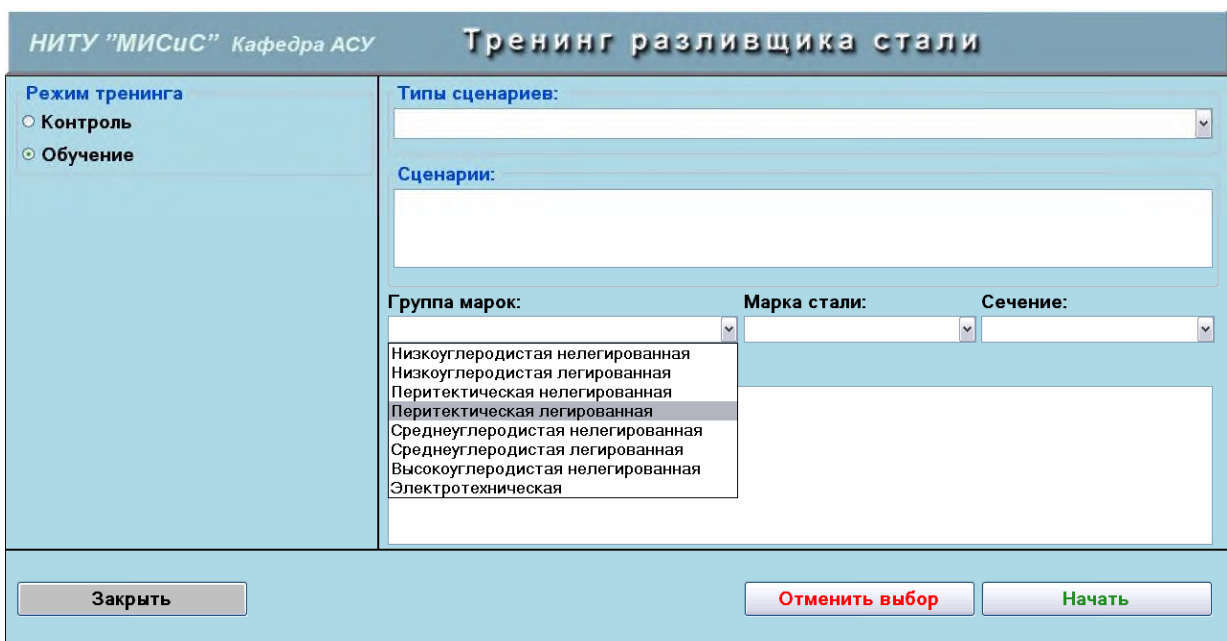


Рисунок 4.3 – Выбор параметров работы в модуле «Тренажер разливки»



Рисунок 4.4 – Внешний вид рабочего окна в режиме тренинга

Содержание сценариев, которые необходимо освоить в процессе выполнения лабораторной работы, и параметры разливки указывает преподаватель после успешного усвоения студентом материала модуля «Конструкция» (см. п. 3.2)



По результатам тренинга по каждому выбранному сценарию формируется отчет (см. рисунок 4.5) в котором указывается последовательность правильных и неправильных действий и суммарное количество ошибок по сценарию.

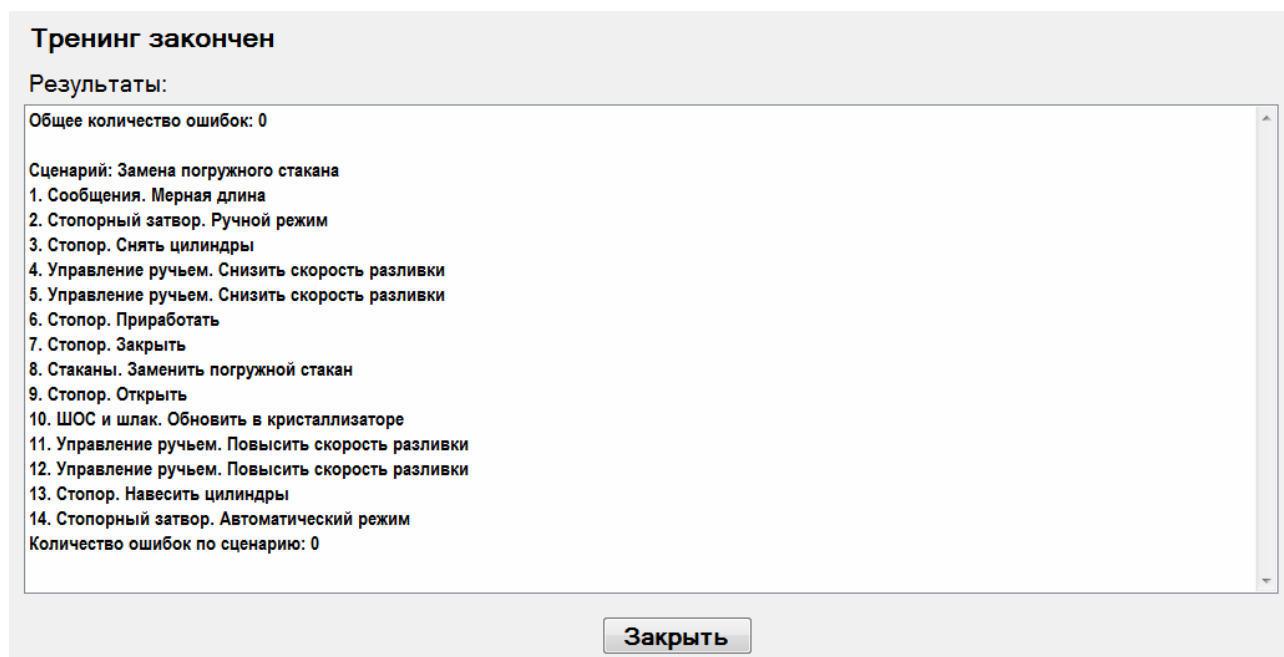


Рисунок 4.5 - Пример отчета о прохождении сценария «Замена погружного стакана»

Результат работы с модулем «Тренажер разливки» в режиме «Обучение» считается положительным при достижении нулевого количества ошибок по каждому пройденному сценарию.

Закончив обучение необходимо пройти тестирование в подсистеме "Тренажер разливки" в режиме "Контроль"», в котором подсказки выводятся только при неправильном действии со стороны обучаемого. Выйти из режима "Контроль" можно лишь пройдя до конца все назначенные задания. Параметры разливки в режиме контроля указываются преподавателем на занятии.

По завершению контрольного тестирования программа выдает результат с указанием правильных и неправильных действий и суммарное количество ошибок.

Добившись безошибочного прохождения заданного сценария в режиме «Контроль» необходимо отчитаться о выполненной работе преподавателю и приступить к оформлению отчета по лабораторной работе.

#### **4 Оформление отчета по работе**

В отчете по лабораторной работе, кроме обязательных элементов отчета, необходимо:

- 1) перечислить основные конструктивные узлы МНЛЗ и кратко описать их назначение и конструктивные особенности;
- 2) описать последовательность технологических операций при изученных в ходе работы штатных и нештатных сценариев;

- 3) выполнить расчеты основных параметров непрерывной разливки стали в соответствии с заданием, приведенным в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Варианты заданий для расчета параметров непрерывной разливки

№ вар.	Вместимость сталеразлив. ковша, т	Типоразмер, мм×мм	№ вар.	Вместимость сталеразлив. ковша, т	Типоразмер, мм×мм
1	120	150 × 700	16	120	200 × 200
2	120	150 × 1100	17	120	250 × 250
3	120	150 × 900	18	240	300 × 400
4	240	150 × 1900	19	180	150 × 150
5	120	250 × 700	20	240	300 × 450
6	240	250 × 1100	21	240	300 × 300
7	120	250 × 900	22	120	250 × 350
8	180	150 × 1550	23	180	350 × 350
9	240	250 × 1550	24	120	250 × 300
10	180	250 × 1900	25	120	250 × 250
11	120	200 × 1000	26	120	200 × 250
12	240	200 × 1900	27	180	200 × 200
13	180	200 × 1500	28	120	150 × 200
14	240	200 × 2200	29	120	150 × 150
15	240	300 × 1000	30	120	120 × 150

В ходе расчетов по варианту, указанному преподавателем, необходимо определить:

- продолжительность затвердевания заготовки (по формуле 4.5);
- скорость вытягивания заготовки (по формуле 4.7);
- толщину твердой корочки металла на выходе из кристаллизатора (по формуле 4.2);
- глубину лунки жидкого металла и требуемую металлургическую длину МНЛЗ (по уравнениям 4.3 и 4.4);
- продолжительность разливки плавки (по формуле 4.8);
- производительность МНЛЗ (по формуле 4.9).

## 5 Контрольные вопросы

- 1 Факторы, определяющие толщину твердой корочки металла на выходе из кристаллизатора.
- 2 Факторы, определяющие глубину расположения жидкой фазы в теле непрерывного слитка.
- 3 Способы расчета толщины затвердевшей корки непрерывного слитка.
- 4 Определение глубины жидкой фазы слитка расчетным путем.
- 5 Технологические параметры, определяющие производительность МНЛЗ.

## **Лабораторная работа 5. Исследование условий охлаждения непрерывнолитой заготовки в ЗВО**

### **1 Цель работы**

- изучение распределения плотности орошения форсунок в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ;
- изучение способов повышения равномерности теплоотвода от поверхности непрерывнолитого слитка в зоне вторичного охлаждения.

### **2 Теоретическое введение**

Зона вторичного охлаждения (ЗВО) МНЛЗ состоит из опорных элементов, поддерживающих заготовку, устройств, обеспечивающих охлаждение слитка, а также специальных устройств, воздействующих на структуру кристаллизующейся заготовки (электромагнитное воздействие, мягкое обжатие, и т.д.). Снижение температуры заготовки в ЗВО достигается путем опрыскивания заготовки водой или водовоздушной смесью, отвода тепла к поддерживающим роликам, а также вследствие конвекции и лучеиспускания в окружающую среду.

Одним из решающих факторов эффективности охлаждения является распределение охладителя по поверхности заготовки, определяемое применяемым режимом охлаждения, конструктивными параметрами форсунок и их расположением. Наряду с качеством воды, подаваемой для охлаждения, наиболее важными элементами ЗВО являются распыляющие форсунки.

В системах вторичного охлаждения современных МНЛЗ применяются полноконусные форсунки, обеспечивающие полное покрытие орошаемой поверхности каплями охладителя (с различной степенью равномерности). В зависимости от конструкции ЗВО применяют форсунки с различной конфигурацией поля орошения (пятна распыла): круг, прямоугольник (квадрат) или овал. Наибольшее применение получили кругло- и плоскофакельные форсунки. Круглофакельные форсунки формируют круглое пятно орошения, полностью покрытое каплями жидкости. Плоскофакельные форсунки, в зависимости от конструктивных особенностей, могут формировать поле орошения прямоугольной или овальной формы. Основные типы форсунок наиболее широко используемых в ЗВО, а также форма образуемого ими факела представлены в таблице 5.1.

Геометрические характеристики полей орошения определяются углами раскрытия факела форсунки (конструкция форсунки), параметрами охлаждающей среды и высотой расположения форсунки. При увеличении высоты расположения и углов раскрытия форсунки увеличивается площадь орошения (при сохранении ее конфигурации), поэтому изменяя эти параметры можно регулировать интенсивность подачи охладителя на поверхность заготовки (уровень теплоотвода от поверхности слитка).

Таблица 5.1 – Основные типы форсунок, применяемых для охлаждения сортовых заготовок, и характер образуемого ими факела

Тип и внешний вид форсунок			
Плоскоструйная (плоскофакельная)	Круглофакельная	Полноконусная с квадратным факелом	
			
Характер поля орошения и внешний вид факела			
прямоугольник	овал	круг	квадрат
			

Кроме различий в характеристиках распыла, форсунки подразделяются по способу подачи охлаждающего вещества: охлаждение струями воды (струйное охлаждение) или водовоздушной смесью (водовоздушное охлаждение).

В струйных форсунках распыление воды осуществляется посредством ее дробления на капли при прохождении через сопло определенной конфигурации. В результате, вода, подаваемая под давлением 0,25-0,35 МПа, самостоятельно дробится (за счет перепада давлений) на капли размером 0,2-1,0 мм и в виде факела плоской, овальной или округлой формы попадает на охлаждаемую поверхность. Необходимая форма факела обеспечивается конструкцией форсунки и ее сопла. Струйное (водяное) охлаждение имеет ряд существенных технологических недостатков: величина теплоотдачи не всегда увеличивается пропорционально увеличению расхода воды; капли из водяной форсунки обычно достаточно крупные, что не способствует увеличению скорости парообразования и ограничивает эффективность охлаждения; в месте воздействия водяной струи с заготовкой происходит термический удар, который может привести к зональной ликвации или образованию трещин и т.д. Между тем, система струйного охлаждения является достаточно простой в конструкционном плане.

Водовоздушное охлаждение осуществляется частицами воды, которые распыляются воздухом. Распыление воды происходит в результате соударения двух потоков (водяного и воздушного) внутри смесителя форсунки. При

пересечении струй под определенными углами происходит их соударение, дробление струи воды и образование направленного водовоздушного факела, форма которого определяется конфигурацией сопла форсунки. Воздух при этом способе охлаждения играет двоякую роль: он обеспечивает распыление воды и сообщает каплям необходимую высокую кинетическую энергию.

Основные технологические преимущества системы водовоздушного охлаждения заключаются в следующем:

- высокие скорости движения потоков непосредственно в отверстии форсунки, что существенно уменьшает вероятность его зарастания;
- высокая эффективность охлаждения, связанная с увеличенной площадью теплообмена между охладителем и заготовкой вследствие образования мелкодисперсных капель воды (размер капель 20-150 мкм) и их высокой кинетической энергией;
- более равномерное распределение охладителя по полю орошения (способствует устранению местного переохлаждения и повторного нагрева металла) и большая устойчивость геометрических размеров факела к изменению параметров охладителя;
- широкий диапазон изменения параметров подачи охлаждающей жидкости и воздуха, что дает возможность использовать один типоразмер форсунок для различных марок сталей и скоростей литья;
- однородность распыления воды вдоль поверхности широких граней слэбов за счет использования нескольких форсунок по ширине (с перекрытием), что снижает вероятность локального переохлаждения (перегрева) поверхности слитка.

Несмотря на существенные преимущества водовоздушного охлаждения, струйная подача охладителя используется достаточно широко, и, повсеместно применяется под кристаллизатором, обеспечивая наряду с интенсивным охлаждением заготовки, теплоотвод от роликов поддерживающей системы (обеспечивая их надежную работу).

Вне зависимости от используемого метода охлаждения заготовки и конструкции применяемых форсунок, параметры вторичного охлаждения должны обеспечивать получение качественной заготовки. Качество непрерывнолитой заготовки во многом зависит от условий ее охлаждения в зоне вторичного охлаждения, поскольку развитие внутренних и поверхностных дефектов определяется величиной напряжений, возникающих в затвердевающей заготовке. Причинами возникновения термических напряжений в затвердевающей корочке является неравномерная скорость охлаждения по периметру заготовки, а также изменяющиеся условия охлаждения по длине вытягиваемого слитка.

Поэтому для ограничения развития трещин в литых заготовках вторичное охлаждение должно обеспечивать:

- равномерное распределение температуры на поверхности заготовки по периметру;

- плавное понижение температуры поверхности заготовки в направлении ее вытягивания;
- обеспечение температуры поверхности заготовки на выходе из зоны вторичного охлаждения не менее 850-900 °С.

Добиться равномерности отвода тепла от поверхности заготовки очень трудно из-за отличающихся условий охлаждения заготовки на разных участках МНЛЗ. Между роликками выделяют несколько зон, отличающихся по механизму теплоотвода: зона орошения водой, натекания струи, участок контактного охлаждения роликком и зона свободной конвекции и излучения на воздухе. О расположении этих зон на поверхности слитка можно судить исходя из рисунка 5.1. Охлаждающая жидкость подается на поверхность при помощи форсунок установленных в зазоре между роликками. Наибольший теплоотвод осуществляется в зоне действия факела форсунки и на участке контактного охлаждения роликком. На других участках наблюдается повторный разогрев поверхности заготовки теплом из центральной части слитка.

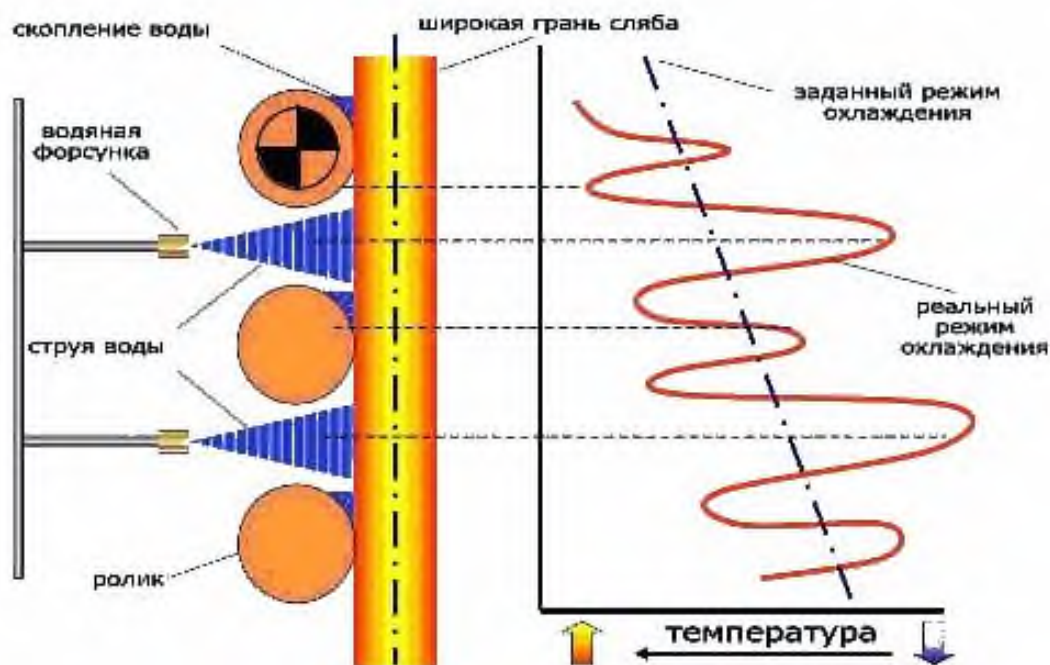
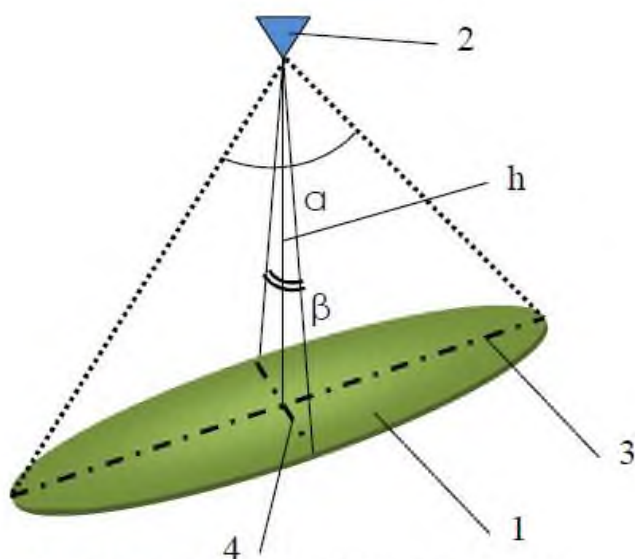


Рисунок 5.1 – Схема элемента зоны вторичного охлаждения

Равномерность температуры поверхности заготовки в поперечном сечении определяется распределением плотности орошения от группы форсунок, расположенных по периметру заготовки. Характер распределения потока жидкости от форсунки в поперечном сечении определяется типом применяемой форсунки, расположением ее относительно охлаждаемой поверхности, углами раскрытия струи, давлением истекающей среды и ее физическими параметрами. Участок действия факела форсунки представляет собой поле орошения (пятно распыла). На рисунке 5.2 представлена схема раскрытия факела плоскофакельной форсунки с овальным полем орошения, где большая ось эллипса соответствует большему углу раскрытия струи и высоте расположения форсунки над плоскостью.



- 1 – поверхность воздействия факела;
- 2 – форсунка;
- 3 – большая ось факела;
- 4 – малая ось факела;
- h – высота расположения форсунки;
- $\alpha, \beta$  – углы раскрытия факела

Рисунок 5.2 - Схема раскрытия факела плоскофакельной форсунки

На текущий момент не существует форсунок, обеспечивающих полностью равномерное охлаждение орошаемой поверхности. Как правило, применяемые в ЗВО форсунки характеризуются параболическим законом распределения охладителя. Распределение охладителя в плоскости орошения форсунки типа У90, применяемой в секциях ЗВО №1-11 МНЛЗ №2 ОАО «Уральская Сталь», полученное опытным путем, представлено на рисунке 5.3.

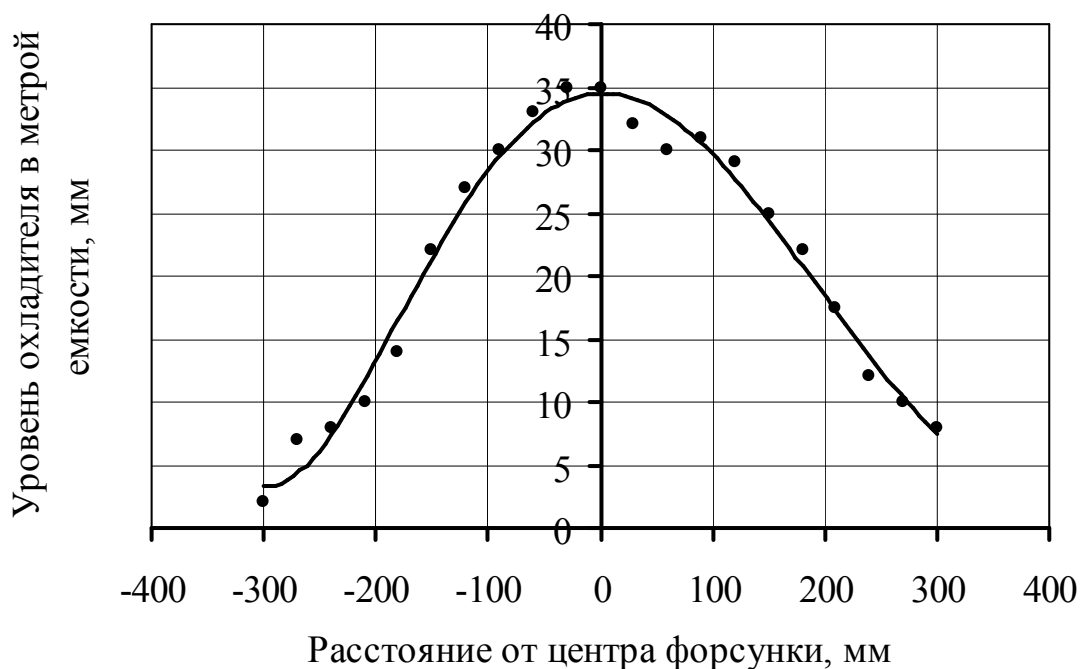


Рис. 5.3. Распределение охладителя в плоскости орошения форсунки типа У90 (по большой оси факела) при расходе воды –  $0,7 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; расходе воздуха –  $1,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; давление воздуха – 2 атм

Учитывая неравномерное распределение охладителя по орошаемой поверхности от одной форсунки, при проектировании ЗВО необходимо следить за тем, чтобы зоны распыления отдельных форсунок соответствующим образом перекрывались для достижения как можно более равномерного распределения коэффициента теплопередачи. Таким образом, суммарная плотность орошения поверхности заготовки в поперечном сечении зависит от взаимного расположения форсунок.

Так, для охлаждения широкой грани сляба на МНЛЗ №2 ОАО «Уральская Сталь» между поддерживающими роликами в ЗВО установлено по 2 плоскофакельные форсунки типа У90 (с каждой стороны). При этом расстояние между ними составляет: в секциях №1-3 – 300 мм, в секциях №4-11 – 340 мм. На рисунке 5.4 представлено распределение охладителя по поверхности заготовки при различных расположениях форсунок относительно центра заготовки.

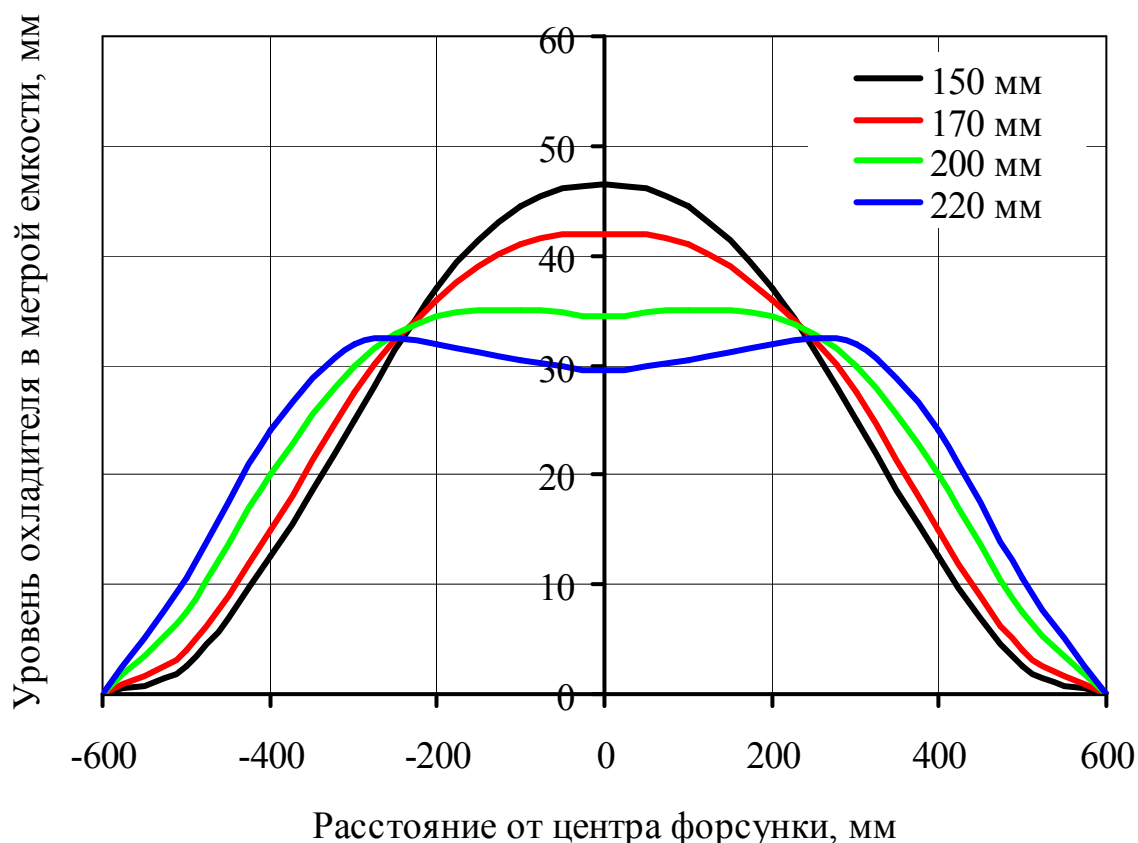


Рис. 5.4. Сравнительный анализ распределения объема охладителя по поверхности заготовки в секциях №1-11 ЗВО при различном удалении форсунок от центральной оси движения заготовки (цифры у кривых)

При расположении форсунок относительно центра заготовки на расстоянии 150 и 170 мм (см. рисунок 5.4), что соответствует фактическим конструктивным параметрам ЗВО, в ее центральной части наблюдается резкое увеличение плотности орошения в месте перекрытия факелов от форсунок, что



может привести к локальному переохлаждению поверхности заготовки в центральной части.

Показанные на рисунке 5.4 закономерности распределения охладителя в секциях ЗВО № 1-11 МНЛЗ №2 подтверждаются экспериментальными данными измерений температуры поверхности заготовки. Так, при выходе сляба толщиной 270 мм (марка стали 09Г2С, скорость вытягивания 0,9 м/мин) из бункера ЗВО на поверхности заготовки со стороны малого радиуса наблюдается темная холодная сердцевина и две светлые горячие полосы на расстоянии  $\sim 1/4$  от края слитка и далее более темные края (рисунок 5.5).

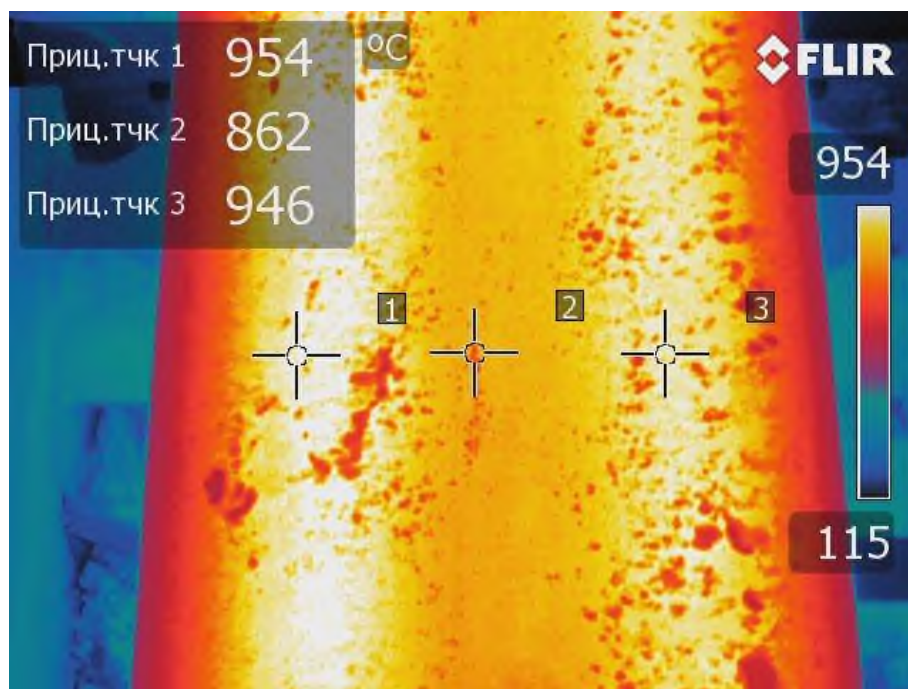


Рис. 5.5. Термограмма поверхности заготовки на выходе из бункера ЗВО

Таким образом, неравномерность охлаждения заготовки как в поперечном, так и в продольном (относительно направления вытягивания) направлении, является причиной возникновения термических напряжений, способствующих возникновению внутренних и поверхностных дефектов в затвердевающей заготовке. Для получения качественной заготовки необходимо оптимизировать режим вторичного охлаждения, изменяя параметры подачи охладителя (расход, давление), конструкцию и взаимное расположение форсунок.

Зная распределение плотности орошения форсунки при различных параметрах охладителя, можно корректировать распределение охладителя по поверхности заготовки (в поперечном сечении) добиваясь равномерной температуры на поверхности заготовки по ее периметру. Регулирующими факторами при этом являются (при постоянных параметрах охладителя) высота и взаимное расположение форсунок. При существующей конструкции ЗВО такими регулирующими факторами является расход и давление охладителя, а также конструкция форсунок, определяющие угол раскрытия струи и плотность орошения поверхности заготовки.

### 3 Методика выполнения работы

Важнейшим элементом, определяющим параметры кристаллизации слитка в зоне вторичного охлаждения, является форсунка (водяная или водовоздушная). Основными критериями при выборе форсунок являются: тип форсунки, исходя из производимого сортамента и конструкций машин (круглофакельные, плоскофакельные); устойчивость параметров форсунки (угол раскрытия факела, распределение охладителя по площади орошения, коэффициент теплоотдачи); диапазон регулирования расхода жидкой фазы.

Изучение параметров работы форсунок проводится на лабораторной установке, позволяющей определять расходные характеристики форсунок и плотность орошения охлаждаемой поверхности. Схема лабораторной установки приведена на рисунке 5.6.

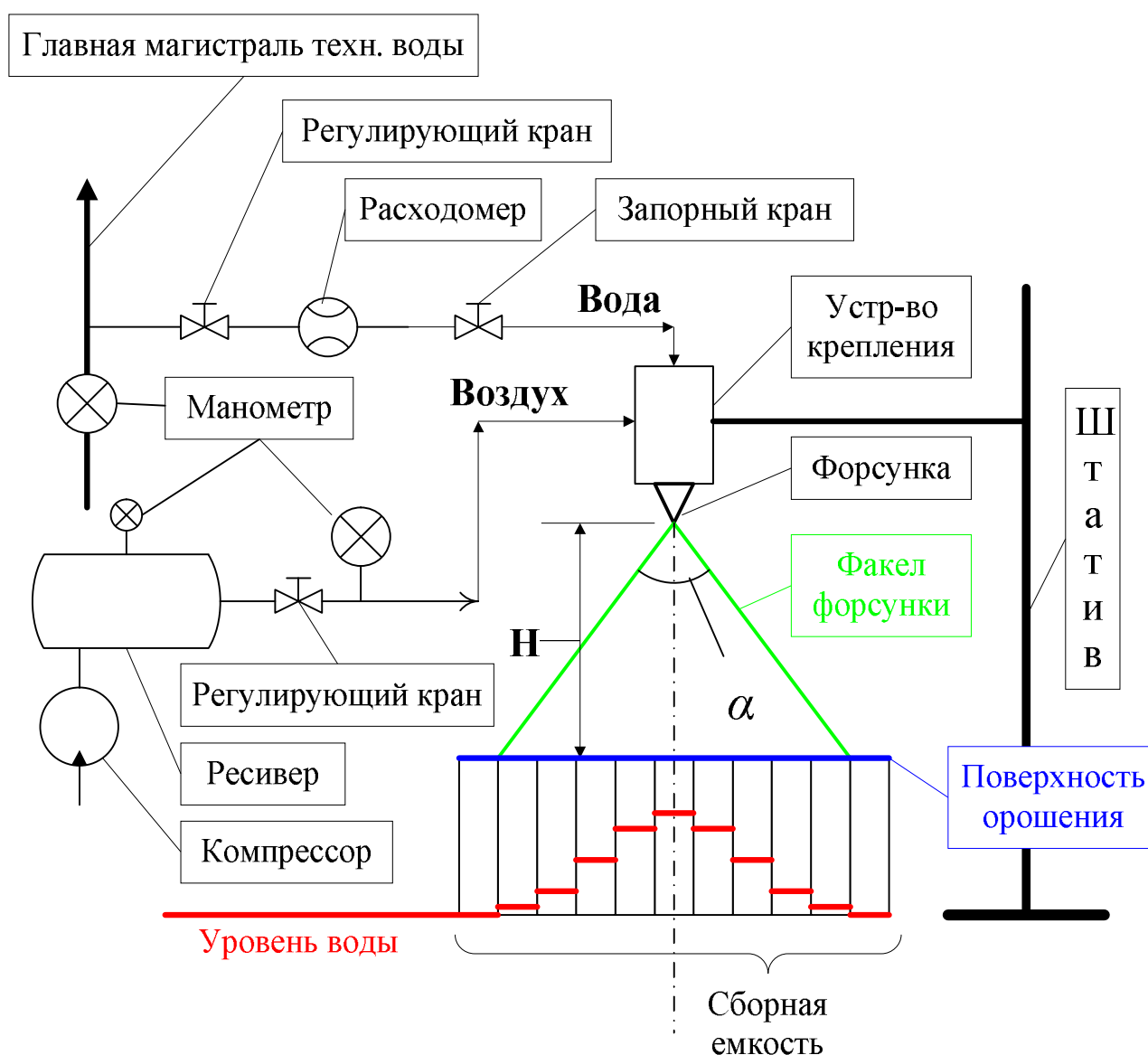


Рисунок 5.6 – Схема лабораторной установки (описание в тексте)

Основными узлами лабораторной установки являются сборная емкость, устройство крепления и позиционирования смесительной камеры и форсунки, системы подвода энергоносителей, измерительные и регулирующие устройства.

Сборная емкость представляет собой герметичный короб со множеством перегородок, образующих 64 изолированных друг от друга емкости высотой 200 и сечением 100x100 мм. Сборная емкость предназначена для улавливания охладителя, подаваемого форсункой и позволяет оценить габаритные размеры поля орошения, угол раскрытия струи и плотность орошения (по уровню воды в мерных емкостях) по осям факела.

Устройство крепления и позиционирования смесительной камеры и форсунки предназначено для установки форсунки (или форсунки со смесителем) в заданное положение над орошаемой поверхностью (верхний срез сборной емкости).

Работа предусматривает изучение параметров работы водяных (струйных) и водовоздушных форсунок, используемых в ЗВО МНЛЗ №1 и 2 ОАО «Уральская Сталь». Виды форсунок и условия их испытаний приведены в таблицах 5.2 и 5.3.

Таблица 5.2 – Характеристика опытных форсунок

Марка	Вид* <sup>1</sup>	Тип* <sup>2</sup>	Место установки		Производитель
			МНЛЗ	Секция ЗВО	
109У	П	С	№2	Подбой	Корад
УТ65	К	С		0	
158У/158УГ	П	С		1-11	
У90	П	ВВ		12-16	
У100	П	ВВ			
660.066.011.17	П	С	№1	Подбой (круг)	Lechler
460.406.30.СЕ	К	С		Сегмент 1 (круг)	
460.366.17.СЕ	К	С		Сегмент 2 (круг)	
148.496.30.39	П	ВВ		Подбой (блюм)	
1РМ.021.17.07	К	ВВ		Сегмент 1-2 (блюм)	
* <sup>1</sup> П – плоскофакельная; К – круглофакельная;					
* <sup>2</sup> С – струйная; ВВ – водовоздушная.					

На лабораторном занятии студенты проводят исследование с одной-двумя форсунками в соответствии с заданным вариантом условий из таблицы 5.3. Испытания каждой форсунки следует производить при пяти значениях расхода воды из указанного в таблице 5.3 рабочего и опытного диапазона:

- первый и второй замер – при минимальных опытно и рабочем расходах;
- третий замер – при среднем рабочем расходе;
- четвертый и пятый замер – при максимальных рабочем и опытно расходах.

Таблица 5.3 – Условия проведения опытов

Марка	Высота расположения, мм	Параметры энергоносителей			
		Давление, атм* <sup>1</sup>	Вода		Воздух
			Расход, л/мин		Давление, атм* <sup>2</sup>
			Рабочий	Опытный	
МНЛЗ №2					
109У	250	2-4	10,4-14,6	4,2-18	-
УТ65			4,0-6,2	2,6-7,0	-
158У/158УГ			6,2-9,3	4,3-11,0	-
У90			1,6-3,0	1,0-4,0	2-3
У100			0,4-1,0	0,4-2,7	
МНЛЗ №1					
660.066.011.17	300* <sup>3</sup>	2-4	0,8-1,3	0,5-2,4	-
460.406.30.СЕ			0,75-1,35	0,5-2,5	-
460.366.17.СЕ			0,75-1,0	0,5-1,6	-
148.496.30.39			0,8-1,8	0,4-2,2	2-3
1РМ.021.17.07			0,8-1,6	0,3-2,4	
* <sup>1</sup> Фиксируется по данным манометра, установленного на центральной магистрали;					
* <sup>2</sup> Поддерживается на заданном уровне регулирующим краном;					
* <sup>3</sup> Фактические расстояния 95-130 мм.					

Перед началом проведения активного эксперимента проводятся подготовительные операции:

- установка опытной форсунки на заданном расстоянии от орошаемой поверхности (Н, см. рисунок 5.6) при помощи устройства крепления и штатива (в случае использования водовоздушных форсунок перед установкой необходимо провести сборку форсунки и смесителя);
- позиционирование форсунки относительно сборной емкости строго по центру (вертикальная ось форсунки должна находиться по центру центральной мерной камеры сборной емкости);
- настройка расхода воды с помощью регулирующего крана на заданный уровень (при постоянном давлении в магистрали);
- закачка в ресивер воздуха до давления 10 атм (при изучении работы водовоздушной форсунки);
- подключение энергоносителей к форсунке: вода для струйной форсунки и вода с воздухом для водовоздушной (в последнем случае подключение производится через смеситель, входящий в комплект водовоздушной форсунки).

После завершения подготовки установки к работе приступают к выполнению исследования. Исследование параметров работы форсунки проводится в следующей последовательности:

- при исследовании водяной (струйной) форсунки производится подача воды (с установленным ранее расходом) в форсунку с помощью запорного крана

(см. рисунок 5.6) в течение 2-3 минут, после чего измеряется уровень воды в каждой мерной камере сборной емкости (при помощи линейки);

- при исследовании водовоздушной форсунки, одновременно с подачей воды (с установленным ранее расходом), включается подача воздуха, давление которого регулируется краном (регулирующий кран на рисунке 5.6) в соответствии с заданием (по манометру). Длительность опыта определяется возможностью поддержания заданного давления воздуха, которое зависит от уровня заданного давления и емкости ресивера. Подача воды прекращается, когда давление воздуха падает ниже заданного уровня, после чего измеряется уровень воды в каждой мерной камере сборной емкости (при помощи линейки).

Результаты измерений по каждой исследуемой форсунке при каждом расходе охладителя фиксируются в таблице, форма которой представлена в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Результаты замеров уровня охладителя в поле орошения

Марка форсунки -							
Расход воды, л/мин -							
Угол раскрытия факела форсунки по большой оси факела, град. - *							
Угол раскрытия факела форсунки по малой оси факела, град. - *							
Уровень охладителя в мерных камерах сборной емкости, мм							
* угол раскрытия факела (см. рисунок 5.2) определяется с использованием основ тригонометрии.							

По данным измерений для каждой изученной форсунки строятся конфигурации поля орошения (по примеру, представленному на рисунке 5.7) и графики распределения охладителя по поверхности орошения (по примеру, представленному на рисунке 5.3) при различных расходах охладителя (допускается изображение опытных данных на одном рисунке по каждой форсунке при различных расходах воды). Графики распределения охладителя для круглофакельной форсунки строятся по любой оси факела, проходящей через центр. Для плоскофакельной форсунки аналогичные графики строятся по большой оси факела (см. рисунок 5.7).

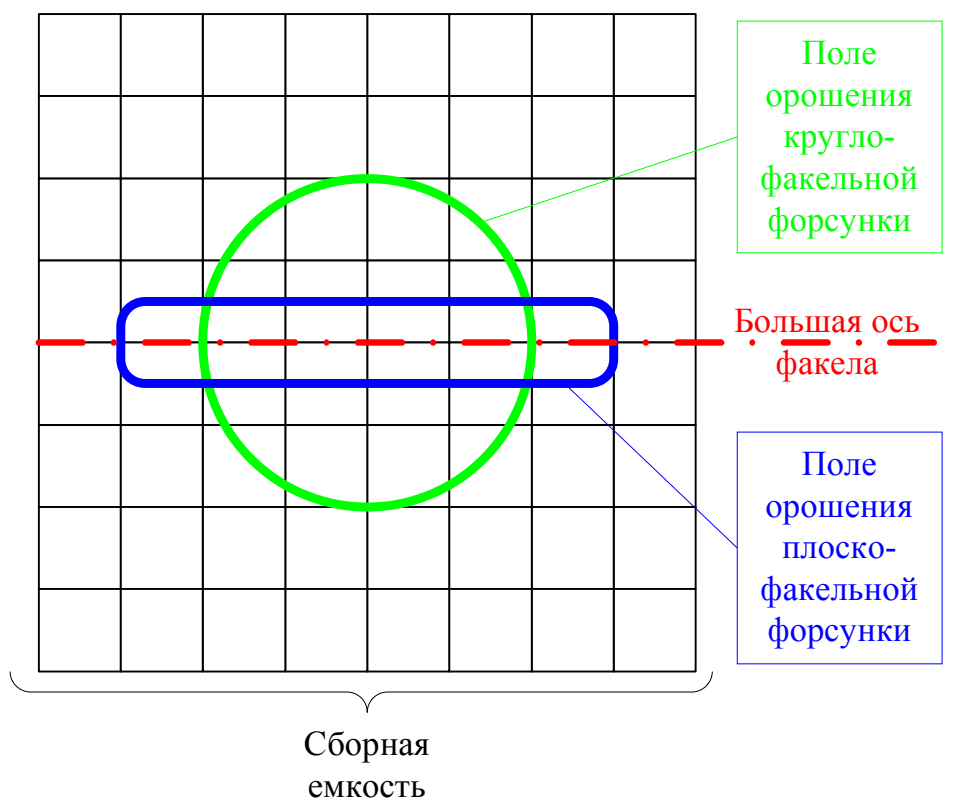


Рисунок 5.7 – Конфигурация поля орошения (пятно распыления) форсунки

Делаются выводы по влиянию расхода воды, вида форсунки и способа распыления (типа форсунки) на распределение охладителя по поверхности орошения и равномерность теплоотвода от поверхности непрерывнолитого слитка в зоне вторичного охлаждения.

#### 4 Контрольные вопросы

- 1 Виды дефектов непрерывнолитой заготовки и основные причины их образования.
- 2 Требования к организации тепловых условий охлаждения непрерывнолитой заготовки в ЗВО.
- 3 Конструктивные элементы ЗВО современных МНЛЗ.
- 4 Условия охлаждения заготовки на разных участках МНЛЗ: особенности, механизмы и равномерность теплоотвода.
- 5 Характерное распределение охладителя по поверхности орошения при использовании современных форсунок.
- 6 Параметры форсунок ЗВО и их влияние на конструкцию ЗВО, условия теплоотвода и качество непрерывнолитой заготовки.
- 7 Влияние параметров охладителя на распределение плотности орошения форсунки и устойчивость ее характеристик.

## Лабораторная работа 6. Изучение дефектов непрерывнолитой заготовки

### 1 Цель работы

- изучение дефектов непрерывнолитой заготовки, причин их возникновения и мер по предупреждению их образования.

### 2 Теоретическое введение

Одной из основных задач при непрерывной разливке стали является управление процессом кристаллизации металла с целью создания условий для формирования качественного слитка, обеспечивающего получения высоких показателей прокатки.

Качество непрерывнолитой заготовки связано с условиями затвердевания. Затвердевание заготовки происходит в течение 10-20 минут и сопровождается сложными физико-химическими процессами, включающими явления массопереноса, изменения химического состава стали. В структуре заготовки обычно явно различимы следующие зоны: корка слитка – зона мелких беспорядочно ориентированных кристаллов (толщина ее зависит от условий разливки и интенсивности охлаждения и составляет 10-20 мм), зона столбчатых кристаллов и осевая зона равноосных беспорядочно ориентированных кристаллов с повышенной концентрацией ликватов и следами усадочных явлений.

При неправильном охлаждении и температурных параметров разливки образуются дефекты. Дефекты формируются в процессе затвердевания и могут развиваться как внутри литой заготовки, так и на внешней поверхности. В большинстве случаев дефекты оказывают негативное влияние на производство, вызывая отбраковку или увеличение себестоимости производства в результате необходимости приведения заготовок в соответствие с требуемыми техническими условиями перед их прокаткой.

К основным дефектам непрерывнолитой заготовки относятся осевая рыхлость, осевая химическая неоднородность, внутренние и поверхностные трещины, точечная неоднородность.

**Осевая пористость (рыхлость)** – скопление крупных и мелких пор вдоль теплового центра кристаллизации слитка в зоне встречи фронтов затвердевания (рисунок 6.1). Этот дефект получает повышенное развитие в связи с наличием в кристаллизующемся слитке очень глубокой и узкой лунки жидкого металла. Образование в ней «моста» сросшихся кристаллов может привести к появлению больших по протяженности зон, в которых металл кристаллизуется без доступа жидкой стали сверху, и, следовательно, к появлению пустот. Особенно сильно осевая пористость проявляется в квадратных и круглых слитках; в плоских слитках она развита слабее, так как усадка металла здесь рассредоточена по продольной оси поперечного сечения слитка. Осевая пористость заметно усиливается при увеличении перегрева металла и

повышенной скорости разливки, иногда переходя в осевые усадочные пустоты. Дефект исчезает при большой степени обжатия и не вызывает нежелательных последствий.

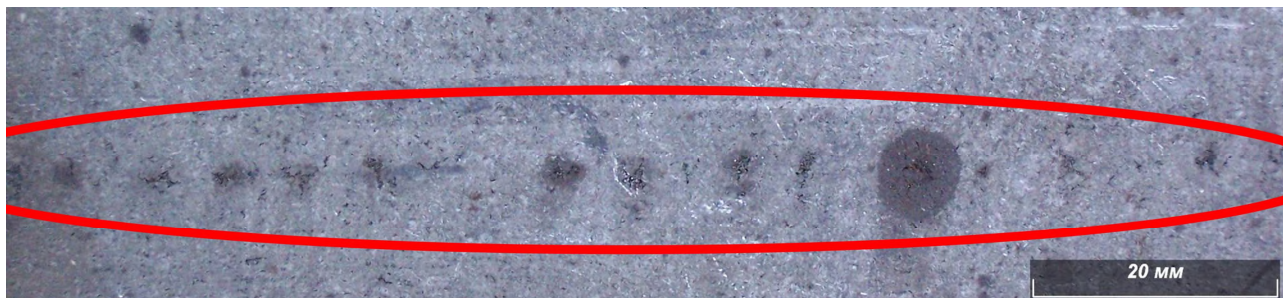


Рисунок 6.1 – Макрофотография дефекта «Осевая рыхлость»

Заметно выражена в непрерывных слитках **осевая ликвация** (осевая химическая неоднородность) - повышенная концентрация ликвирующих примесей в сердцевине заготовки. На темплетах (см. рисунок 6.2) наблюдается в виде скопления отдельных точек повышенной травимости в центральной части заготовки.

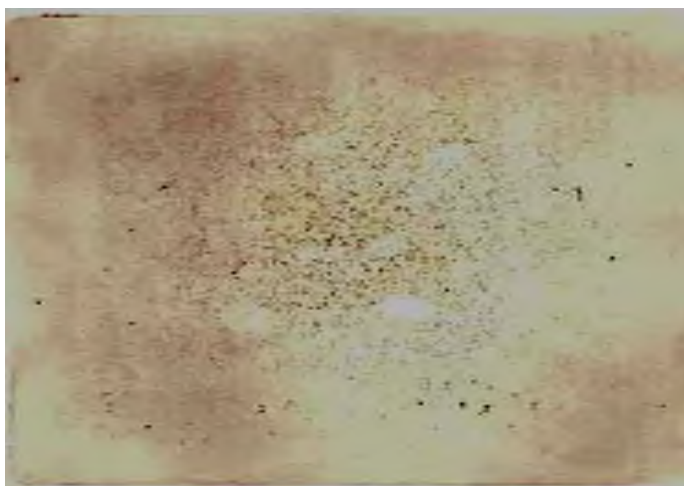


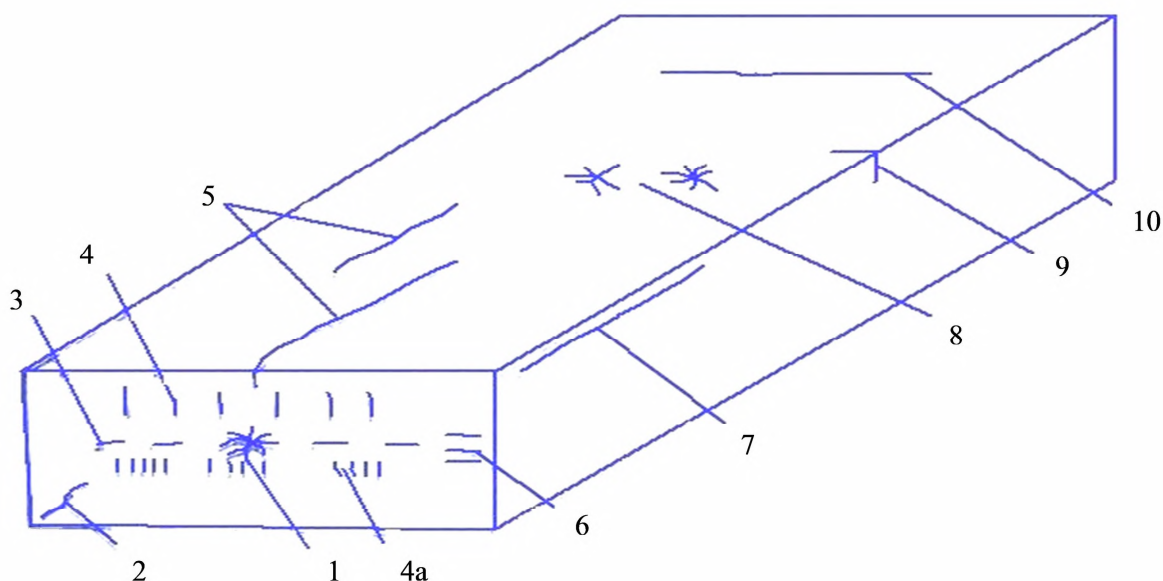
Рисунок 6.2 – Серный отпечаток поперечного темплета блюмовой заготовки с дефектом «Осевая химическая неоднородность»

Осевая химическая неоднородность возникает вследствие явления «избирательной кристаллизации» и наличия конвективных потоков в незатвердевшей части заготовки. Чем шире температурный интервал кристаллизации сплава и больше длительность затвердевания (толщина заготовки), тем большее развитие получает ликвация, причем наибольшей, склонность к ней проявляют те компоненты сплава, которые наиболее сильно влияют на ширину интервала кристаллизации (S, P, C, O). В результате в осевой зоне наряду с осевой рыхлостью наблюдается неоднородность по содержанию углерода в виде темных участков. Снижению развития осевой неоднородности способствует разливка стали с температурой перегрева 10-15 °С и пониженное содержание ликватов в стали (главным образом серы и фосфора). Осевая химическая неоднородность литой заготовки, как правило, при прокатке не



устраняется. Наличие описанной зоны после прокатки заготовки на лист может приводить к его расслоению.

Распространенным дефектом являются трещины – поверхностные и внутренние (см. рисунок 6.3). Образование трещин в непрерывно-литой заготовке может быть вызвано различными причинами: низкими пластичностью и прочностью твердого каркаса при высоких температурах, металлургическими особенностями процесса кристаллизации, ферростатическим давлением, которое испытывает твердая оболочка слитка, температурными напряжениями, трением при изгибе-разгибе, механическими нагрузками и деформациями и пр.. Если суммарная нагрузка создает в твердом каркасе напряжения, превышающие критические, то в процессе затвердевания развиваются трещины.



1 – центральная трещина; 2 – диагональные трещины; 3 – осевые трещины (осевая пористость); 4 – внутренние трещины перпендикулярные широким граням слитка; 5 – продольные поверхностные трещины на гранях слитка; 6 – трещины, перпендикулярные узким граням слитка; 7 – продольные трещины по ребрам (углам); 8 – паукообразные и сетчатые трещины; 9 – поперечные трещины в углах слитка; 10 – поперечные поверхностные трещины (надрывы корки)

Рисунок 6.3 – Расположение трещин в непрерывнолитой заготовке

При существенном развитии осевой рыхлости и химической неоднородности в центральной части заготовки может образовываться **осевая трещина**. Осевые трещины (см. рисунок 6.3, 3) в слябах располагаются по их большой оси в зоне смыкания фронтов кристаллизации. Осевая трещина представляет собой нарушение сплошности центральной зоны непрерывнолитой заготовки в виде извилистой трещины и имеет ширину раскрытия от 0,05 до 0,30 мм (рис. 6.4). Эти трещины образуются в результате усадки стали, если она не компенсируется сжимающим усилием опорных роликов; особенно они проявляются при выпучивании широких граней слитка,

когда сжимающие усилия явно недостаточны. В слитках квадратного сечения, где усадка сконцентрирована в центре слитка, форма осевых трещин иная (см. рисунок 6.3, 1). Значительное влияние на развитие осевых трещин оказывает повышенное содержание серы.



Рисунок 6.4 – Макроструктура дефекта «осевая трещина»

**Продольные поверхностные трещины** на гранях слитка имеют длину до 1-1,5 м и более и глубину до 10-15 мм (рисунок 6.3, 5). Эти трещины (рисунок 6.5) являются результатом усадочных напряжений и образуются при неравномерном прилегании формирующейся корки к стенкам кристаллизатора в местах уменьшенной ее толщины, которые возникают из-за снижения теплоотвода там, где корка отходит от стенок (например в результате деформации слитка или коробления стенок кристаллизатора). Местное уменьшение толщины корки и образование трещин может также происходить вследствие размывания корки струей металла, особенно при его подачи в кристаллизатор вертикальной струей. Вероятность возникновения продольных трещин повышается при перегреве стали и увеличении скорости, при увеличении содержания серы в металле и снижении величины отношения  $[Mn]/[S]$ , при увеличении ширины плоского слитка и при содержании углерода в нелегированных сталях в пределах 0,18-0,25%. Действенным средством борьбы с этим дефектом является разливка с защитным шлаковым покрытием, поскольку образующаяся между коркой и стенками кристаллизатора тонкая шлаковая прослойка существенно снижает неравномерность теплоотвода.



Рисунок 6.5 – Макрофотография дефекта «Продольная трещина»

**Продольные трещины по ребрам** (углам) (см. рисунок 6.3, 7) – располагаются вдоль направления движения слитка на уровне углов и прилегающих к ним зон граней. Могут сопровождаться искажением профиля слитка, одновременным раздутием перпендикулярных граней заготовки, продольными «ужиминами», а также внутренними приугловыми трещинами (или быть их развитием), являются предварительной ступенью для образования прорывов жидкого металла.

В слябах такие трещины возникают на расстоянии ~350 мм от уровня металла в кристаллизаторе в случае отхода корки слитка от узкой стенки кристаллизатора вследствие ее износа или изменения угла ее наклона (неправильная установка кристаллизатора).

**Поперечные поверхностные трещины** (см. рисунок 6.3, 10 и 6.6) (надрывы корки) появляются под действием растягивающих напряжений вдоль оси слитка, превышающих предел прочности стали. Поперечные трещины возникают в кристаллизаторе вследствие усиленного трения при недостаточной смазке стенок и вследствие зависания корки при наличии на стенках кристаллизатора царапин, вмятин. Их «залечивание» в кристаллизаторе приводит к образованию заливин (наплывов), а значительное их развитие ведет к прорыву металла. Такие трещины могут возникать также в результате механических напряжений, возникающих при изгибании или выпрямлении

слитка на МНЛЗ с криволинейной осью. Поперечные трещины в углах слитка (рисунок 6.3, 9 и 6.6) могут также образовываться в результате слишком интенсивного вторичного охлаждения на выходе заготовки из кристаллизатора, где охлаждение водой поверхности заготовки наиболее интенсивное.



Рисунок 6.6 – Поперечная трещина на поверхности заготовки (а) и угловая поперечная трещина (б)

**Паукообразные и сетчатые трещины** (см. рисунок 6.3, 8) схожи, каждая трещина распространяется из одного центра в нескольких направлениях. **Паукообразные трещины** (расходящиеся от центра тонкие трещины в виде «звезды» или «паука» - см. рисунок 6.7) возникают в кристаллизаторе при неравномерном прилегании корки к его стенкам в местах плотного прилегания, т.е. в участках наиболее сильного охлаждения. Паукообразные трещины возникают при температурах ликвидуса и проходят по границам первичных зерен, ослабленным жидкими пленками сульфидов, цветных металлов или их легкоплавкими оксидами. Паукообразные (звездообразные) трещины характерны, прежде всего, для перитектического класса сталей (содержание углерода 0,12-0,18%). Пораженность этими трещинами снижается при разливке со шлаковым покрытием в кристаллизаторе, так как шлаковая прослойка предотвращает непосредственный контакт стенок с коркой, уменьшая неравномерность ее охлаждения. **Сетчатые трещины** (взаимно пересекающиеся небольшие извилистые трещины в виде сетки – см. рисунок 6.8) образуются ниже температур солидуса (при температурах 700-900<sup>0</sup>С), в зоне вторичного охлаждения, по границам зёрен, ослабленным неметаллическими включениями в результате чередования нагревов и охлаждений поверхности слитка (охлаждение у форсунок и разогрев за счет внутреннего тепла слитка при его движении между форсунками). Количество этих трещин сильно снижается при переходе от водяного к более мягкому водовоздушному вторичному охлаждению.



Рисунок 6.7 – Макрофотография дефекта «Паукообразная трещина»



Рисунок 6.8 – Макрофотография дефекта «Сетчатая трещина» на слябовой заготовке

Многообразные **внутренние трещины** образуются в результате совместного воздействия термических напряжений в охлаждаемом слитке и механических усилий от опорных, тянущих и изгибающих роликов. Распространены **внутренние трещины, перпендикулярные широким граням слитка** (см. рисунок 6.3, 4). Основной причиной их возникновения считают механическое воздействие роликов на затвердевающую корочку слитка и средством борьбы с ними – правильную настройку роликовой проводки и сохранение постоянства расстояния между роликами. Такие трещины могут также возникать из-за термических напряжений при неравномерном вторичном охлаждении.

**Гнездообразные трещины** (см. рисунок 6.3, 4а и 6.9) – представляют собой разрывы металла в виде пересекающихся друг с другом лентообразных трещин. Причиной их образование являются усадочные напряжения внутренних слоев твердой оболочки, вызванные повышенными температурными градиентами по длине заготовки вследствие неправильной настройки вторичного охлаждения.



Рисунок 6.9 – Макрофотография дефекта «Гнездообразная трещина»

**Трещины, перпендикулярные узким граням** (см. рисунок 6.3, 6) и расположенные вблизи от них, возникают при выпучивании широких граней слитка, т. е. при недостаточном поддержании оболочки слитка опорными устройствами.

**Диагональные трещины** (см. рисунок 6.3, 2) на стыке кристаллов, растущих от двух смежных граней, встречаются преимущественно в слитках квадратного сечения при искажении профиля в тупых углах.

Одним из последствий развития внутренних трещин, перпендикулярным граням заготовки, является образование **ликвационных полосок** (рисунок 6.10) – трещины деформации, проходят через центр слитка и направлены, в основном, перпендикулярно граням, образуются в случае значительного обжата заготовки при одновременном интенсивном вторичном охлаждении, при обжиге заготовок с незатвердевшей сердцевиной, а также в результате разгиба заготовок при высоких скоростях вытягивания и температуре металла. Образующиеся трещины в процессе затвердевания заготовки заполняются жидким металлом (из центральной части слитка), обогащенным ликватами, поэтому при травлении на поверхности темплета наблюдается чередование полосок различного химического состава.

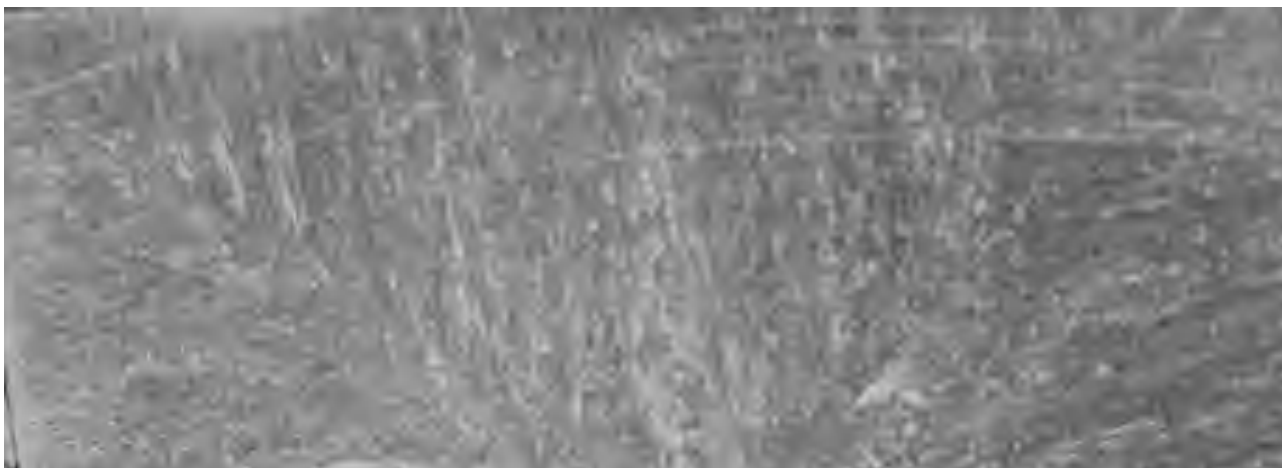


Рисунок 6.10 – Травленный темплет с дефектом «Ликвационные полоски»

В слитках радиальных и криволинейных МНЛЗ наблюдается некоторая **несимметричность структуры** и распределения составляющих стали, поскольку зона затвердевания последних порций металла, а следовательно, и усадочная пористость, и скопление ликвидирующих примесей смещены к верхней грани слитка. У верхней грани наблюдается также повышенное содержание неметаллических включений вследствие их всплывания.

Иногда наблюдается **искажение формы слитка**. Для слитков квадратного сечения характерна **ромбичность** – искажения профиля слитка в кристаллизаторе, когда квадратное сечение деформируется в ромбическое. Причины: перекося слитка в кристаллизаторе под воздействием несоосно расположенных с ним опорных роликов, неравномерное охлаждение различных граней слитка в кристаллизаторе. Для слябовой заготовки искажения профиля проявляется в виде **раздутия слитка** (выпуклость его поперечного сечения), которое возникает под воздействием ферростатического давления столба жидкой стали в слитке. Возникновению дефекта способствуют повышенные скорости разливки и температура металла, что уменьшает толщину затвердевшей корки; недостаточная интенсивность вторичного охлаждения;

отклонения в настройке опорных роликов; увеличенное расстояние между опорными роликами.

**Точечная неоднородность** – представляет собой точечные участки повышенной травимости по сечению темплета (рис. 6.11). Дефект располагается преимущественно вблизи поверхности на малом радиусе широкой грани сляба и представляет собой групповые локальные скопления неметаллических включений. Образование дефекта связано с оставшимися в стали продуктами раскисления (оксидные включения) или с наличием эвтектических сульфидов марганца и железа, которые образовались в конце затвердевания при захлопывании оставшейся в дендритной ячейке жидкости.



Рисунок 6.11 – Макрофотография дефекта «Точечная неоднородность»

**Газовые пузыри** в корковом слое слитка возникают при недостаточно раскисленном металле, высоком содержании в нем водорода, повышенном содержании влаги в защитной шлаковой смеси, вводимой в кристаллизатор.

Ряд поверхностных дефектов слитка связан с неудовлетворительной организацией разливки. **Шлаковые включения** на поверхности возникают при заливке жидким металлом прилипающих к стенкам кристаллизатора частиц шлака или размытых огнеупоров. **Ужимины** (поперечные углубления на поверхности слитка) возникают в результате резкого изменения напора струи и колебаний уровня металла в кристаллизаторе, при местном размывании корки струей металла и в участках неплотного прилегания корки к стенкам кристаллизатора.

Поверхностные и внутренние дефекты возникают в непрерывнолитых слитках по целому ряду причин, которые нередко комбинируются и усиливают взаимодействие друг друга. Основные виды дефектов непрерывнолитой слябовой заготовки и их возникновения представлены в таблице 6.1.



Таблица 6.1 – Основные дефекты непрерывнолитой заготовки и причины их образования

Фактор, влияющий на появление дефекта	Дефекты непрерывнолитой заготовки								
	Внутренние					Поверхностные			
	Осевая рыхлость	Осевая хим. неоднородность	Осевая трещина	Гнездообразная трещина	Точечная неоднородность	Трещина перпенд. узкой грани	Трещина перпенд. широкой грани	Сетчатые и паукообразная трещины	Угловая трещина
<b>Технологические параметры</b>									
Высокая (* низкая) температура разливаемого металла	+	+	+	+	+*	+	+	+	+
Высокая (* низкая) скорость разливки	+	+	+	+	+*	+	+	+	
Высокое содержание S и P	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Высокое содержание [H], [N], [O]	+	+	+		+				
Загрязнение неметаллическими включениями	+	+	+		+				
Некачественная ШОС и/или неравномерная её подача						+	+	+	+
<b>Кристаллизатор</b>									
Неравномерный и/или недостаточный теплоотвод в кристаллизаторе						+	+	+	+
Размытие корочки струей металла					+	+	+		+
Прилипание корочки металла к стенкам кристаллизатора						+	+		+
Повреждение (износ) стенок кристаллизатора						+	+		+
Неисправность механизма качения кристаллизатора						+	+		+
Несовпадение оси кристаллизатора с технологической осью установки						+	+		+
<b>Зона вторичного охлаждения</b>									
Неравномерный и/или недостаточный теплоотвод в ЗВО	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Неудовлетворительная настройка поддерживающей системы ЗВО	+	+	+						
Износ опорных роликов			+						
Высокий раствор между роликами			+				+		
<b>Зона изгиба-правки</b>									
Разгиб незатвердевшей заготовки	+	+	+	+					
Износ роликов	+	+	+	+					
Высокий раствор между изгибающими роликами	+	+	+	+					
Выпуклость граней заготовки	+	+	+	+					

Для контроля и установления причин возникновения дефектов на каждом предприятии установлен регламент контроля качества непрерывнолитых заготовок. Дефекты поверхности и внутреннего строения заготовки выявляют и оценивают на продольных и поперечных темплетах.

### **3 Методика выполнения работы**

В лаборатории представлена коллекция поперечных темплетов слябовых и круглых заготовок, отлитых на МНЛЗ ОАО «Уральская Сталь». Имеющиеся в лаборатории темплеты позволяют изучить такие дефекты как осевая рыхлость, осевая трещина, осевая химическая неоднородность, ликвационные полосы, сетчатые и паукообразные трещины, поперечные трещины. В ходе выполнения лабораторной работы студенты, используя материалы теоретического введения, изучают на темплетах характерные внешние признаки и особенности дефектов непрерывнолитых заготовок.

В процессе изучения коллекции темплетов и материалов теоретического введения, студенты должны научиться идентифицировать основные дефекты макроструктуры и поверхности непрерывнолитой заготовки, а также усвоить причины их возникновения и мероприятия по их устранению (недопущению).

Работа выполняется путем эскизирования дефектов, которое сопровождается их кратким описанием с указанием причин возникновения и мер предупреждения. Эскиз должен выполняться вручную. Ксерокопирование методических указаний **не допускается**.

В отчете по работе, кроме обязательных пунктов, приводятся эскизы изученных дефектов с их кратким описанием и указанием причин возникновения, мер предупреждения

### **4 Контрольные вопросы**

- 1 Виды дефектов непрерывнолитой заготовки.
- 2 Какие дефекты слитка относятся к поверхностным?
- 3 Какие дефекты слитка являются внутренними?
- 4 Как выглядит изучаемый дефект?
- 5 Каковы причины возникновения изучаемого дефекта?
- 6 Каковы меры предупреждения образования изучаемого дефекта?

## Библиографический список

1. Кудрин В.А. Теория и технология производства стали: Учебник для вузов. – М.: "Мир", ООО "Издательство АСТ", 2003. – 528с.
2. Лякишев Н.П., Шалимов А.Г. Развитие технологии непрерывной разливки стали, М., ЭЛИЗ, 2002. – 208 с.
3. Дюдкин, Д.А. Процессы выплавки, внепечной обработки и непрерывной разливки стали. – М.: Теплотехник, 2008. – 528 с.
4. Бровман М.Я. Непрерывная разливка металлов. – М.: Экомет, 2007. – 484 с.
5. Дюдкин Д.А., Крупман Л.И., Максименко Д.М. Усадочные раковины в стальных слитках и заготовках. – М.: Metallurgia, 1983. – 136с.
6. Китаев Е.М. Затвердевание стальных слитков. – М.: Metallurgia, 1982. – 168с.

ШАПОВАЛОВ АЛЕКСЕЙ НИКОЛАЕВИЧ

## **РАЗЛИВКА И КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ СТАЛИ**

Лабораторный практикум по дисциплинам  
«Разливка стали и специальная металлургия»,  
«Теория и технология разливки стали»

Направление подготовки: 150400 «Металлургия»

Профиль 1 «Металлургия черных металлов»

Квалификация (степень) выпускника: Бакалавр

Форма обучения: очная, заочная

Подписано в печать 16.04.2014		
Формат 60x90 $\frac{1}{16}$ Рег. № 38	Печать офсетная Тираж 30 экз.	Уч.-изд.л. 4,25

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Новотроицкий филиал

462359, Оренбургская обл., г. Новотроицк, ул. Фрунзе, 8.

E-mail: [nfmisis@yandex.ru](mailto:nfmisis@yandex.ru)

Контактный тел. 8 (3537) 679729.