

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»  
НОВОТРОИЦКИЙ ФИЛИАЛ

Кафедра металлургических технологий и оборудования

**А.Н. Шаповалов**

## **РАЗЛИВКА И КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ СТАЛИ**

Методические указания для проведения практических занятий и самостоятельной работы студентов по дисциплинам «Разливка и кристаллизация стали» и «Теория и технология разливки стали»

Направление подготовки: 22.03.02 Металлургия  
Квалификация (степень) выпускника: Бакалавр  
Форма обучения: очная, заочная

Новотроицк, 2021

УДК 669.18  
ББК 34.32  
Ш 24

**Рецензенты:**

*Начальник управления технического сопровождения сталеплавильного производства АО «Уральская Сталь», к.т.н.*

***М.С. Кузнецов***

*Доцент кафедры металлургических технологий и оборудования Новотроицкого филиала ФГАОУ ВО НИТУ «МИСиС», к.т.н., доцент*

***Е.В. Братковский***

Шаповалов А.Н. Разливка и кристаллизация стали: методические указания для проведения практических занятий. – Новотроицк: НФ НИТУ «МИСиС», 2021. – 63 с.

В указаниях на практических примерах представлена методика проведения приближенных расчетов технологических параметров разливки и затвердевания непрерывнолитых заготовок и слитков. Расчеты процессов разливки и затвердевания стали базируются на теоретических представлениях и практических закономерностях кристаллизации стали при различных способах разливки. Все представленные в указаниях задачи многовариантны, приведен справочный материал, необходимый для их решения.

Указания предназначены для проведения практических занятий и самостоятельной работы студентов, изучающих дисциплины «Разливка и кристаллизация стали» и «Теория и технология разливки стали» в рамках освоения образовательной программы по направлению подготовки бакалавров 22.03.02 Metallurgy (профиль «Metallurgy черных металлов») в НФ НИТУ «МИСиС».

Указания составлены в соответствии с требованиями образовательного стандарта высшего образования НИТУ «МИСиС» по направлению подготовки 22.03.02 Metallurgy.

*Рекомендовано Методическим советом НФ НИТУ «МИСиС»*

© Новотроицкий филиал  
ФГАОУ ВО «Национальный  
исследовательский технологический  
университет «МИСиС», 2021

## Содержание

Введение .....	4
1 Разливка стали в изложницы.....	5
1.1 Способы разливки стали в изложницы и их характеристика.....	5
1.2 Расчеты продолжительности и скорости затвердевания стальных слитков .....	9
1.3 Определение параметров усадки в слитках спокойной стали .....	15
1.4 Определение параметров качества слитка кипящей стали.....	21
1.5 Определение параметров качества слитка полуспокойной стали .....	23
1.6 Расчеты скорости наполнения изложниц .....	24
1.7 Расчеты диаметра канала разливочного стакана стальковша .....	28
1.8 Расчеты продолжительности разливки плавки в изложницы .....	36
1.9 Задачи для самостоятельного решения .....	38
2 Непрерывная разливка стали.....	42
2.1 Характеристика непрерывной разливки стали .....	42
2.2 Расчеты динамики и продолжительности затвердевания непрерывнолитой заготовки.....	43
2.3 Расчеты технологических параметров непрерывной разливки .....	48
2.4 Расчеты диаметров разливочных стаканов для непрерывной разливки стали .	57
2.5 Задачи для самостоятельного решения .....	60
Рекомендуемая литература.....	62

## Введение

Выплавленную в сталеплавильном агрегате сталь выпускают в разливочный ковш и далее, после завершения операций ковшевой обработки, разливают в металлические формы – изложницы или направляют на машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). В результате получают стальные слитки (в виде усеченной пирамиды) или непрерывнолитые заготовки (заготовки с постоянным по длине сечением), являющиеся основой для получения готовой продукции.

Таким образом, разливка стали является одним из важных этапов сталеплавильного производства. Технология и организация разливки в значительной степени определяют качество готового металла и количество отходов при дальнейшем переделе стальных слитков (заготовок).

Поэтому одним из этапов подготовки бакалавров-металлургов к практической деятельности является освоение ими теории и практики разливки и затвердевания стали.

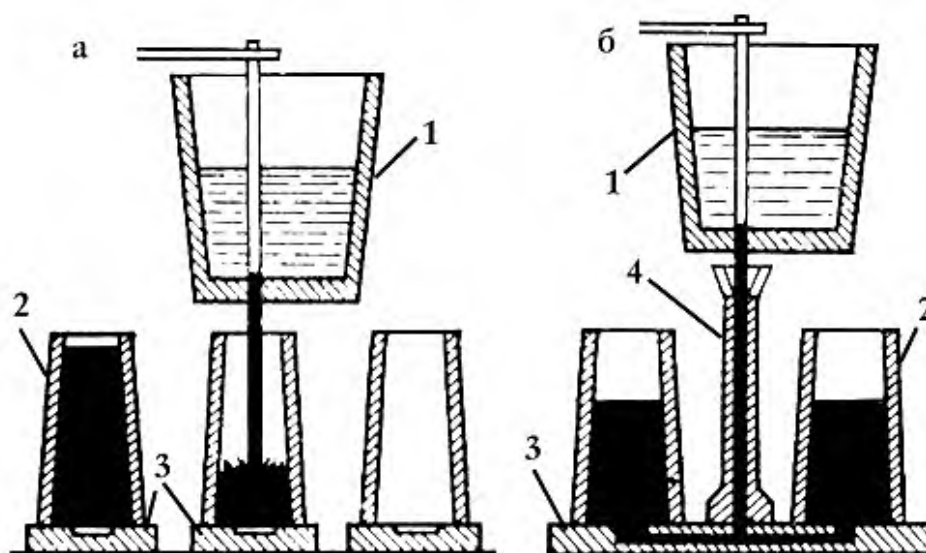
Цель методических указаний заключается в изучении основных закономерностей процессов разливки и затвердевания стали путем выполнения прикладных расчетов по определению основных параметров непрерывной разливки стали и разливки стали в изложницы.

## 1 Разливка стали в изложницы

### 1.1 Способы разливки стали в изложницы и их характеристика

Применяют два основных способа разливки стали: разливку в изложницы и непрерывную разливку. Разливку в изложницы подразделяют на разливку «сверху» и «сифоном».

При разливке сверху сталь непосредственно из сталеразливочного ковша поступает в изложницы, устанавливаемые на чугунных плитах – поддонах (рис. 1а). После заполнения каждой изложницы стопор или шиберный затвор сталеразливочного ковша закрывают, ковш транспортируют к следующей изложнице, вновь открывают стопор (шиберный затвор) и после заполнения сталью новой изложницы цикл повторяют.



1 – ковш с металлом; 2 – изложница; 3 – поддон; 4 – центральный литник

Рисунок 1 – Разливка стали сверху (а) и сифоном (б)

При сифонной разливке, основанной на принципе сообщающихся сосудов, жидкая сталь из ковша поступает в установленный на поддоне футерованный изнутри центральный литник (см. рисунок 1б), а из него по футерованным каналам поддона в изложницы снизу. Центральный литник и изложницы устанавливают на массивной чугунной плите – поддоне, имеющей канавки, в которые укладывают пустотелый сифонный кирпич (трубки или проводки). При сифонной разливке сталью одновременно заполняют несколько (от двух до шестидесяти) изложниц. После наполнения всех установленных на поддоне изложниц стопор (шиберный затвор) закрывают, и ковш транспортируют к следующему поддону.

Разливка сверху обеспечивает существенные преимущества по сравнению с разливкой сифоном:

1) Упрощается трудоемкость подготовки разливочного оборудования, а также конструкция поддонов.

2) Отсутствует загрязнение стали неметаллическими включениями от размывания огнеупоров центрального литника, сифонных проводок и донного стаканчика в изложнице.

3) Исключаются потери металла на литниковую систему и скрап, образующийся при прорывах сифонных проводок.

4) Требуется более низкая температура металла перед разливкой из-за большей линейной скорости наполнения изложниц и отсутствия охлаждения металла в сифонных проводках.

5) Обеспечивается более благоприятное расположение усадочной раковины в слитках спокойной стали, прибыльная часть которых заполняется медленно в последнюю очередь при смещении теплового центра слитка вверх, а из-за более низкой температуры разливаемого металла сокращается и общий объем открытой усадочной раковины.

6) Создаются более благоприятные условия формирования наружной корки слитков (рис. 2), что позволяет разливать сталь с большей скоростью, чем сифоном. Разливка сверху обеспечивает последовательное перемещение зоны интенсивной циркуляции металла снизу вверх. При этом максимальное ферростатическое давление воспринимается более прочной коркой внизу слитка, которая формируется в условиях относительно спокойного состояния стали и не омывается потоками горячего металла.

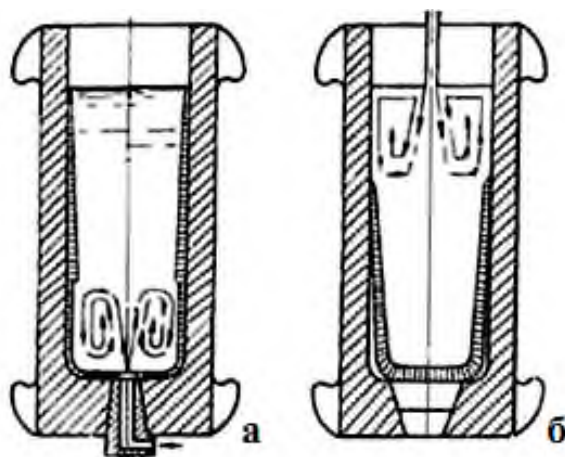


Рисунок 2 – Характер циркуляционных потоков жидкой стали при сифонной разливке (а) и при разливке сверху (б)

7) Более высокий выход годных слитков и низкие затраты на подготовку составов снижают себестоимость стали на 2-3 %.

Однако при необходимости получения большого количества слитков с одной плавки разливка стали сверху связана с некоторыми недостатками:

1) Увеличение продолжительности разливки плавки, особенно при отливке мелких слитков. При этом чтобы предотвратить чрезмерное остывание металла и образование настывлей в ковшах, увеличивают скорость разливки в ущерб качеству слитков. При большой скорости разливки кипящей стали не обеспечивается требуемая толщина «здоровой» корочки, а в слитках спокойной и полуспокойной стали увеличивается пораженность горячими трещинами. Кроме того, при повышенной скорости разливки в слитках спокойной стали увеличивается глубина усадочной раковины и подусадочной рыхлости. Для всех типов стали увеличивается брызгообразование и приваривание слитков.

2) С увеличением числа отливаемых слитков и продолжительности разливки ухудшаются условия работы стопора (шиберного затвора) – многократные перекрытия стопорных или шиберных затворов снижают их стойкость и надежность. Кроме того, растет количество переездов и центровок струи, увеличивая общую продолжительность разливки. Решением этой проблемы является разливка стали из 2-х стопорных ковшей, или применение многостопорных промежуточных ковшей.

3) Образование плен на поверхности нижней части слитков, что является следствием разбрызгивания металла при ударе струи о дно изложницы и ведет к росту общей трудоемкости операций по зачистке поверхности слитка. Застывшие на стенках изложницы и окисленные с поверхности капли (и заплески металла) не растворяются в поднимающейся жидкой стали и не свариваются с основной массой слитка, образуя плену на поверхности заготовок при прокатке слитков.

4) Приваривание донной части слитков к изложницам (поддонам при сквозных изложницах). При этом значительно снижается стойкость изложниц (поддонов), а из-за затрудненной усадки в корке слитка возникают дополнительные растягивающие напряжения и повышается вероятность образования поперечных горячих трещин. Размывание струей металла донной части изложниц (поддонов), сопровождается изменением химического состава металла в донной части слитка, а также снижением примерно в два раза сроков службы изложниц (поддонов). Защита дна изложниц (поддонов) обеспечивается вкладышами, листовой обрешкой, обмазками, изолирующими засыпками и т.п.

5) При разливке сверху спокойной стали наблюдается более высокое вторичное окисление и насыщение металла азотом. Это связано с большей длиной струи, обильным брызго- и пленообразованием. При этом более высокая скорость наполнения изложниц сверху затрудняет дегазацию металла из-за повышения гидростатического давления.

Основные преимущества и недостатки разливки металла в изложницы сверху и сифоном сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Преимущества («+») и недостатки («-») разливки металла в изложницы сверху и сифонным способом\*

Технологические параметры	Показатели разливки	Способ разливки	
		«сверху»	«сифоном»
Одновременная отливка нескольких слитков	Сокращает длительность разливки плавки и позволяет разливать в мелкие слитки плавки большой массы	«-» Ограничено (до 2-х при использовании двухстопорных ковшей)	«+» возможно (от 2 до 60 шт.)
Применение защиты зеркала металла в изложнице шлаковыми смесями или жидким шлаком	Обеспечивает лучшее качество слитка по поверхностным дефектам и неметаллическим включениям	«-»	«+» удобно
Разбрызгивание струи металла при разливке (ударе о дно изложницы)	Влияет на образование поверхностных дефектов – «плена»	«-» высокое	«+» минимально
Продолжительность разливки плавки на слитки одной массы**	Влияет на условия работы футеровки стальной ковша и стопора (шиберного затвора)	«-» высокая	«+» низкая
Контроль за поведением металла («зеркала») в изложнице	Обеспечивает возможность корректировки за счет регулирования скорости разливки	«-» сложен	«+» возможен
Подготовка оборудования к разливке	Влияет на трудоемкость подготовки и стоимость разливки	«+» простая	«-» сложная
Потери металла в виде литников	Снижает выход годного при разливке	«+» отсутствуют	«-» высокие от 0,7 до 2,5 % от массы разливаемой стали
Температура перегрева металла в ковше в начале разливки (при одинаковой продолжительности разливки плавки)	Влияет на затраты энергии и усадочные дефекты	«+» 20-30 °С	«-» 40-60 °С вследствие охлаждения в каналах сифонной проводки
Размывание сифонного кирпича	Ведет к загрязнению стали неметаллическими включениями	«+» отсутствует	«-» возможно
* достоинства и недостатки оцениваются, соответственно, знаками «+» или «-» с комментариями; ** с учетом более высокой линейной скорости наполнения изложницы при разливке сверху этот недостаток нивелируется.			

Таким образом, основными недостатками разливки сверху является ухудшение качества поверхности, а также увеличение продолжительности разливки плавки (при большом количестве слитков) и связанные с этим последствия. С



целью уменьшения напора струи и разбрызгивания металла на стенки изложниц разливку сверху начинают замедленно (неполной струей), снижают скорость струи металла у дна (уменьшая до минимума расстояние между дном ковша и изложницей), применяют изложницы со сферической формой днища и поддоны с кюмпельными углублениями, вкладыши и манжеты специальной формы, а иногда используют промежуточные устройства: промежуточные воронки или промежуточные ковши. Промежуточные емкости обеспечивают разливку при практически постоянном ферростатическом давлении. Промежуточные ковши, оборудованные дозирующими устройствами (2-6 шт.), позволяют также в широких пределах регулировать скорость наполнения изложниц, значительно сокращать продолжительность разливки, улучшать качество поверхности слитков и увеличивать стойкость изложниц. Однако применение промежуточных ковшей требует повышения температуры металла, увеличения расхода огнеупоров и затрат труда, значительно усложняет оборудование и организацию работ в разливочном пролете. В связи с этим применение их ограничивается, в основном, непрерывной разливкой, которая невозможна без обеспечения постоянного и небольшого напора струи металла, направляемой в кристаллизатор (сквозная водоохлаждаемая форма).

Рассмотренные способы разливки стали в изложницы имеют свои преимущества и недостатки, и, несмотря на бурное развитие непрерывной разливки, применяются в действующих сталеплавильных цехах. Благодаря простоте и отсутствию потерь металла с литниками часто предпочитают разливку сверху, особенно при отливке средних и крупных слитков углеродистых и низколегированных сталей. Несмотря на необходимость дополнительной зачистки поверхности проката, разливка сверху для рядовых марок является более экономичной, чем разливка сифоном. В то же время высококачественные в легированные стали, когда стремятся уменьшить потери дорогостоящего металла на зачистку, получить чистую поверхность слитка и минимальное количество неметаллических включений, разливают главным образом сифоном. Сифонной разливкой, как правило, получают также слитки массой менее 2,5 т. Потери металла при разливке сифоном и сверху в виде скрапа и недоливов составляют 0,6-1,9 %; при разливке сифоном дополнительно теряется 0,7-2,5 % разливаемой стали в виде литников.

## **1.2 Расчеты продолжительности и скорости затвердевания стальных слитков**

При затвердевании стали в изложнице/кристаллизаторе тепло отводится через стенки, поэтому зарождение и рост кристаллов начинаются у стенок излож-

ницы/кристаллизатора, а толщина затвердевшего слоя непрерывно возрастает в направлении к центру слитка/заготовки.

Толщину затвердевшего слоя металла в изложнице/кристаллизаторе приближенно можно определить по формуле

$$\xi = k \sqrt{\frac{\tau}{K_{\phi}}},$$

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

$\tau$  – продолжительность затвердевания, мин;

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

$k$  – коэффициент затвердевания, который зависит от перегрева, состава и поведения стали при затвердевании, мм/мин<sup>1/2</sup>.

Численное значение коэффициента формы  $K_{\phi}$  принимается равным единице при отношении ширины к толщине затвердевающего слитка в районе теплового центра ( $b/a \geq 2$ ). Если  $b/a < 2$ , то коэффициент формы рассчитывается по уравнению:

$$K_{\phi} = 0,5 + 0,25 \cdot b/a \text{ (если } b/a < 2\text{)}.$$

Величину коэффициента затвердевания ( $k$ ) для сталей различного состава при нормальной величине перегрева в 10-30 °С (в момент попадания в изложницу/кристаллизатор) рекомендуется принимать в пределах:

- от 22 до 23 мм/мин<sup>1/2</sup> для кипящей стали;
- от 23 до 25 мм/мин<sup>1/2</sup> для полуспокойной;
- от 25 до 27 мм/мин<sup>1/2</sup> для спокойной.

С повышением перегрева разливаемого металла на каждые 10 °С коэффициент затвердевания снижается на 1 мм/мин<sup>1/2</sup>.

При известной продолжительности затвердевания ( $\tau$ , мин) и толщине затвердевшего слоя металла ( $\xi$ , мм) можно определить среднюю скорость затвердевания ( $v$ , мм/мин) из выражения

$$v = \frac{\xi}{\tau}.$$

**Задача № 1.1.** Определить продолжительность затвердевания 12-т слитка стали марки 50, имеющего следующие размеры:

Основная часть:

- высота  $H = 1930$  мм;
- ширина верхней части  $B_B = 1470$  мм, нижней  $B_H = 1450$  мм;
- толщина верхней части  $A_B = 630$  мм, нижней  $A_H = 590$  мм.

Прибыльная часть:

- высота  $h = 430$  мм;
- ширина верхней части  $b_B = 1240$  мм, нижней  $b_H = 1440$  мм;
- толщина верхней части  $a_B = 470$  мм, нижней  $a_H = 600$  мм.

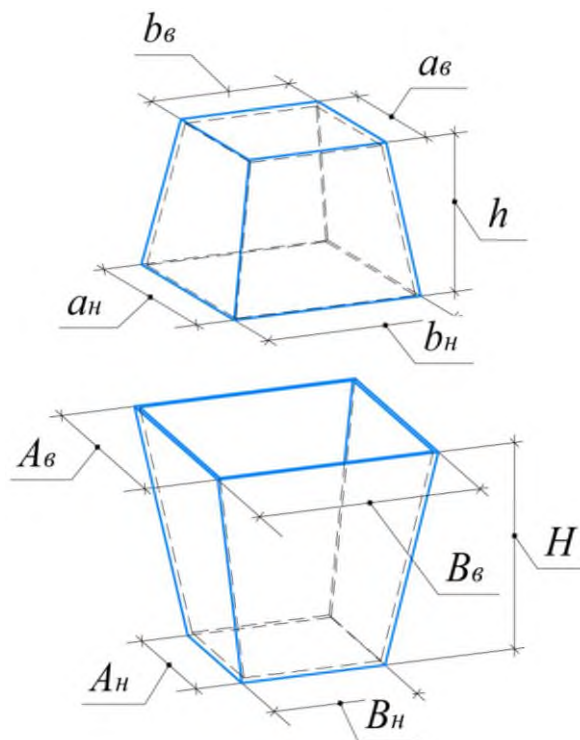


Рисунок 3 – Условные обозначения размеров слитка

Решение:

Продолжительности затвердевания слитка определяется по формуле

$$\tau = K_{\phi} \cdot \left( \frac{\zeta}{k} \right)^2.$$

Затвердевания слитка завершается в сечении, являющемся тепловым центром. Для уширенного слитка спокойной стали с прибыльной частью тепловой центр находится в самой широкой части основного тела слитка – в подприбыльной части, имеющей сечение  $630 \times 1470$  мм. Поскольку для полного затвердевания слитка необходимо чтобы толщина затвердевшего слоя стала равной половине максимальной толщины слитка в районе теплового центра, затвердевание рассматриваемого в задаче слитка завершается тогда, когда толщина затвердевшего слоя станет равной половине толщины в подприбыльной части слитка  $\zeta = a/2$ , где  $a = 630$  мм.

Для разливаемой спокойной стали марки 50 коэффициент затвердевания  $k$  принимаем равным  $25 \text{ мм/мин}^{1/2}$ . Для данного слитка отношение  $b/a > 2$ , поэтому коэффициент формы равен 1.

Тогда

$$\tau = 1 \cdot \left( \frac{630}{2 \cdot 25} \right)^2 = 159 \text{ мин} \approx 2 \text{ ч } 39 \text{ мин}.$$

**Задача № 1.2.** Определить продолжительность и среднюю скорость затвердевания 7,8-т слитка стали марки 70, имеющего следующие размеры:

Основная часть:

- высота  $H = 1900$  мм;
- ширина верхней части  $B_B = 770$  мм, нижней  $B_H = 810$  мм;
- толщина верхней части  $A_B = 600$  мм, нижней  $A_H = 660$  мм.

Прибыльная часть:

- высота  $h = 400$  мм;
- ширина верхней части  $b_B = 700$  мм, нижней  $b_H = 740$  мм;
- толщина верхней части  $a_B = 540$  мм, нижней  $a_H = 570$  мм.

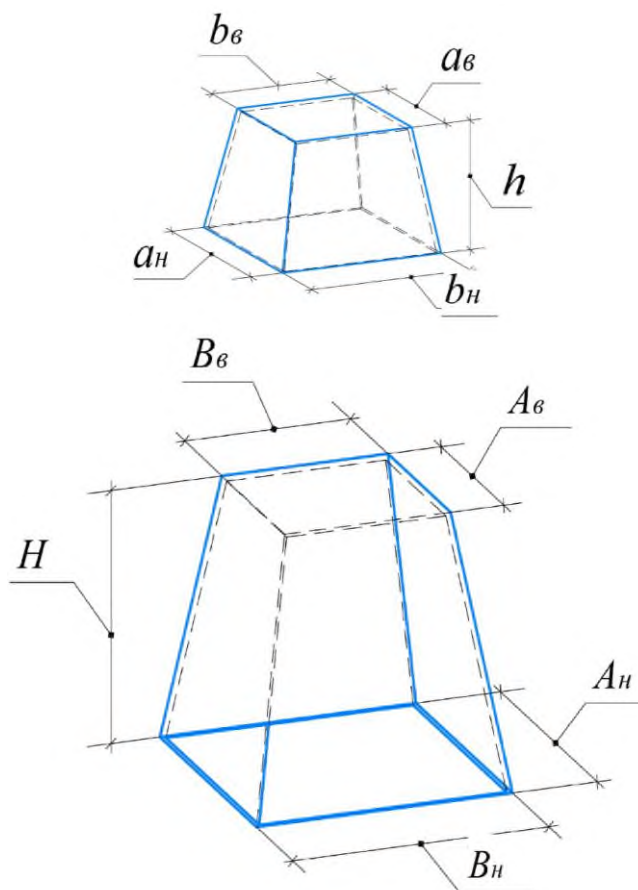


Рисунок 4 – Условные обозначения размеров слитка

Решение:

Продолжительности затвердевания слитка определяется по формуле

$$\tau = K_{\Phi} \cdot \left( \frac{\xi}{k} \right)^2.$$

Поскольку сталь разливается в изложницу, уширенную книзу, то затвердевание последних порций металла должно заканчиваться на некотором расстоянии от дна изложницы – в районе теплового центра. Для определения толщины слитка в районе теплового центра применим правило теплового центра: считаем, что тепловой центр находится от дна слитка на расстоянии равном половине толщины слитка в его нижней части. Тогда это расстояние  $C = a/2 = 660/2 = 330$  мм. Разница между толщинами слитка в верхней и нижней части  $\Delta a = 660 - 600 = 60$  мм.

Составляем пропорцию:

- при высоте слитка  $1900$  мм –  $\Delta a = 60$  мм;
  - при высоте теплового центра  $330$  мм – разница толщин составит  $X$ , мм.
- Тогда  $X = 330 \cdot 60 / 1900 = 10,4$  мм.

В итоге, толщина слитка в районе теплового центра равна  $a = 660 - 10,4 = 649,6$  мм – этот размер будет определять продолжительность затвердевания.

Затвердевание рассматриваемого в задаче слитка завершается тогда, когда толщина затвердевшего слоя станет равной половине толщины в районе теплового центра, то есть при  $\zeta = 649,6/2 = 324,8$  мм.

Для разливаемой спокойной стали коэффициент затвердевания принимаем равным  $k = 25$  мм/мин<sup>1/2</sup>. Для слитка с сечением в районе теплового центра 600×770 мм отношение  $b/a = 1,283$ , поэтому коэффициент формы равен

$$K_{\phi} = 0,5 + 0,25 \cdot b/a = 0,5 + 0,25 \cdot 1,283 = 0,82.$$

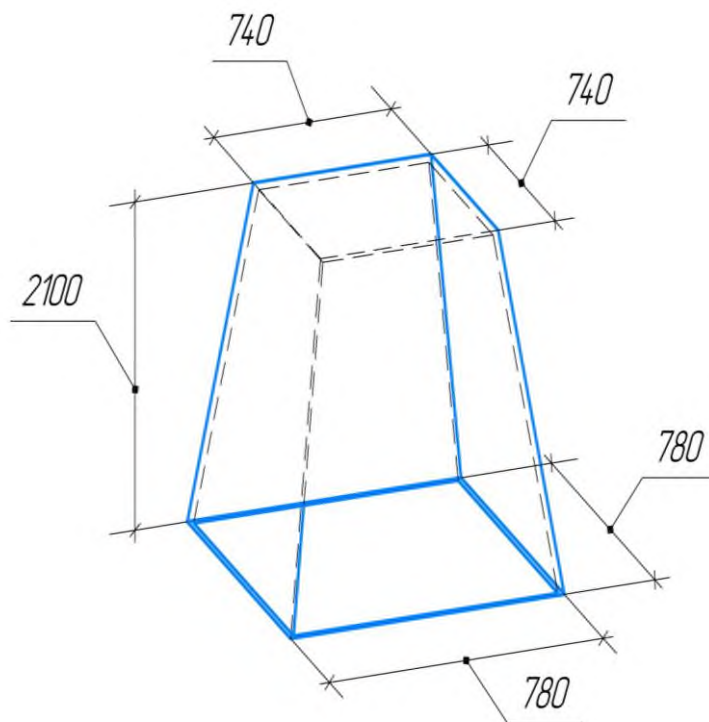
Тогда

$$\tau = 0,82 \cdot \left( \frac{324,8}{25} \right)^2 = 139 \text{ мин} \approx 2 \text{ ч } 19 \text{ мин.}$$

Среднюю скорость затвердевания ( $v$ , мм/мин) при толщине затвердевшего слоя металла ( $\xi = 324,8$  мм) и продолжительности затвердевания ( $\tau = 139$  мин) составит

$$v = \frac{324,8}{139} = 2,34 \text{ мм/мин.}$$

**Задача № 1.3.** Определить продолжительность и среднюю скорость затвердевания 8-т слитка стали марки 10кп, имеющего следующие размеры (рис. 5): высота  $h = 2100$  мм; сечение верхней части  $740 \times 740$  мм, нижней  $780 \times 780$  мм.



Риснок 5 – Условные обозначения размеров слитка

Решение:

Продолжительности затвердевания слитка определяется по формуле

$$\tau = K_{\phi} \cdot \left( \frac{\xi}{k} \right)^2.$$

Для кипящей стали коэффициент затвердевания принимаем равным  $k = 23 \text{ мм/мин}^{1/2}$ . Для слитка квадратного сечения коэффициент формы равен 0,75.

Поскольку кипящую сталь разливают в изложницы, уширенные книзу, то затвердевание последних порций металла должно заканчиваться на некотором расстоянии от дна изложницы – в районе теплового центра. Для определения толщины слитка в районе теплового центра применим правило теплового центра: считаем, что тепловой центр находится от дна слитка на расстоянии равном половине толщины слитка в его нижней части. Тогда это расстояние  $C = a/2 = 780/2 = 390 \text{ мм}$ . Разница между толщинами слитка в верхней и нижней части  $\Delta a = 780 - 740 = 40 \text{ мм}$ .

Составляем пропорцию:

- при высоте 2100 мм –  $\Delta a = 40 \text{ мм}$ ;

- при высоте 390 мм –  $X, \text{ мм}$ .

Тогда  $X = 390 \cdot 40 / 2100 = 7,4 \text{ мм}$ .

Тогда толщина слитка в районе теплового центра равна  $780 - 7,4 = 772,6 \text{ мм}$  – этот размер будет определять продолжительность затвердевания.

Затвердевание рассматриваемого в задаче слитка завершается тогда, когда толщина затвердевшего слоя ( $\xi$ ) станет равной половине толщины в районе теплового центра, то есть при  $\xi = 772,6/2 = 386,3 \text{ мм}$ .

Тогда

$$\tau = 0,75 \cdot \left( \frac{772,6}{2 \cdot 23} \right)^2 = 212 \text{ мин} \approx 3 \text{ ч } 32 \text{ мин.}$$

Среднюю скорость затвердевания ( $v, \text{ мм/мин}$ ) при толщине затвердевшего слоя металла ( $\xi = 386,3 \text{ мм}$ ) и продолжительности затвердевания ( $\tau = 212 \text{ мин}$ ) составит

$$v = \frac{386,3}{212} = 1,82 \text{ мм / мин.}$$

**Задача № 1.4.** Определить продолжительность и среднюю скорость затвердевания 9-т слитка стали марки 15пс, имеющего следующие размеры (обозначения по рис. 5): высота  $h = 2150 \text{ мм}$ ; ширина верхней части  $b_{\text{в}} = 870 \text{ мм}$ , нижней  $b_{\text{н}} = 930 \text{ мм}$ ; толщина верхней части  $a_{\text{в}} = 570 \text{ мм}$ , нижней  $a_{\text{н}} = 630 \text{ мм}$ .

Решение:

Продолжительности затвердевания слитка определяется по формуле

$$\tau = K_{\phi} \cdot \left( \frac{\xi}{k} \right)^2.$$

Для полуспокойной стали коэффициент затвердевания принимаем равным  $k = 24 \text{ мм/мин}^{1/2}$ . Для определения коэффициента формы слитка принимаем размеры сечения, наиболее близкого к тепловому центру, то есть сечение низа слитка с размерами  $630 \times 930 \text{ мм}$  и отношением  $b/a = 1,48$ .

Тогда коэффициент формы равен

$$K_{\phi} = 0,5 + 0,25 \cdot b/a = 0,5 + 0,25 \cdot 1,48 = 0,87.$$

Поскольку сталь разливают в изложницы, уширенные книзу, то затвердевание последних порций металла должно заканчиваться на некотором расстоянии от дна изложницы – в районе теплового центра. Для определения толщины слитка в районе теплового центра применим правило теплового центра: считаем, что тепловой центр находится от дна слитка на расстоянии равном половине толщины слитка в его нижней части. Тогда это расстояние  $C = a/2 = 630/2 = 315 \text{ мм}$ . Разница между толщинами слитка в верхней и нижней части  $\Delta a = 630 - 570 = 60 \text{ мм}$ .

Составляем пропорцию: при высоте  $2150 \text{ мм} - \Delta a = 60 \text{ мм}$ ;

При высоте  $315 - X$ .

Тогда  $X = 315 \cdot 60 / 2150 = 8,8 \text{ мм}$ .

Тогда толщина слитка в районе теплового центра равна  $630 - 8,8 = 621 \text{ мм}$  – этот размер будет определять продолжительность затвердевания.

Затвердевание рассматриваемого в задаче слитка завершается тогда, когда толщина затвердевшего слоя ( $\zeta$ ) станет равной половине толщины в районе теплового центра, то есть при  $\zeta = 621/2 = 310,5 \text{ мм}$ .

Тогда

$$\tau = 0,87 \cdot \left( \frac{621}{2 \cdot 24} \right)^2 = 146 \text{ мин} \approx 2 \text{ ч } 26 \text{ мин}.$$

Среднюю скорость затвердевания ( $v$ , мм/мин) при толщине затвердевшего слоя металла ( $\xi = 310,53 \text{ мм}$ ) и продолжительности затвердевания ( $\tau = 146 \text{ мин}$ ) составит

$$v = \frac{310,5}{146} = 2,13 \text{ мм/мин}.$$

### 1.3 Определение параметров усадки в слитках спокойной стали

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. спокойной стали. Различают открытую и закрытую усадочные раковины (рис. 6). 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.

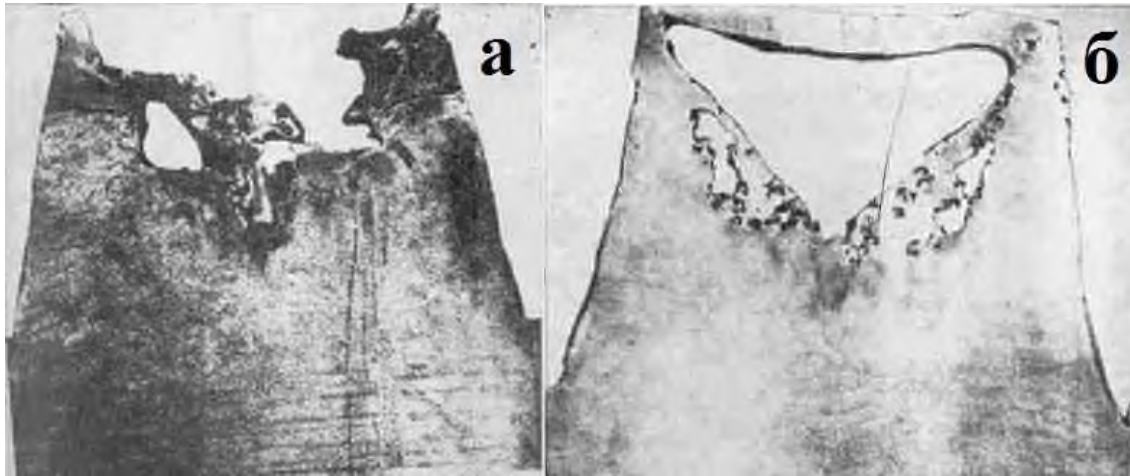


Рисунок 6 – Открытая (а) и закрытая (б) усадочные раковины в продольном разрезе уширенных кверху слитков спокойной стали

Образование усадочной раковины неизбежно и 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.

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

$$V_{ур} = \frac{\alpha \cdot V_{ж}}{100},$$

где  $V_{ур}$  – относительный объем усадочной раковины, %;

$\alpha$  – коэффициент естественной усадки стали, %;

$V_{ж}$  – объем жидкой части слитка в момент окончания заливки, %.



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.

Для уменьшения глубины усадочной раковины необходимо разливать спокойную сталь с минимальным перегревом (до 30°C) в уширенные кверху изложницы с утепленными прибыльными надставками и теплоизоляцией зеркала металла, 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.

Однако, даже при соблюдении технологии разливки, головная обрезь от слитков спокойной стали рядового сортамента составляет 10-16 % от массы слитка, а для качественных сталей достигает 25 %.

**Задача № 1.5.** Определить относительный объем усадочной раковины в 7,8-т слитке стали марки 50 из задачи № 1.2 (см. рис. 4), отлитой сверху в течение 5 мин. Время заполнения прибыли 2,5 мин.

Решение.

Основная часть слитка: высота  $h = 1900$  мм; ширина верхней части  $b_v = 770$  мм, нижней  $b_n = 810$  мм; толщина верхней части  $a_v = 600$  мм, нижней  $a_n = 660$  мм.

Прибыльная часть слитка: высота  $h = 400$  мм; ширина верхней части  $b_v = 700$  мм, нижней  $b_n = 740$  мм; толщина верхней части  $a_v = 540$  мм, нижней  $a_n = 570$  мм

Относительный объем усадочной раковины ( $V_{отн}$ , %) можно определить из выражения

$$V_{отн} = \frac{V_{ур}}{V_{сл}} \cdot 100,$$

где  $V_{ур}$  – объем усадки, м<sup>3</sup>;  
 $V_{сл}$  – объем слитка, м<sup>3</sup>.

Объем слитка (основной части, без прибыли) определяем по формуле  $V_{\text{сл}}=A \cdot B \cdot H$ . Средняя ширина слитка  $A = (770+810)/2 = 790$  мм; толщина  $B = (600+660)/2=630$  мм; высота слитка  $H = 1900$  мм. Тогда объем слитка  $V_{\text{сл}}=0,63 \cdot 0,9 \cdot 1,9 = 0,946 \text{ м}^3$ .

Объем усадочной раковины можно определить по уравнению

$$V_{\text{ур}} = \frac{V_{\text{ж}} \cdot \alpha}{100}.$$

Усадочная раковина образуется вследствие естественной усадки металла, находящегося в жидком виде после наполнения изложницы, то есть количество металла, затвердевшего за время наполнения изложницы необходимо исключить.

За время наполнения изложницы (5 мин) формируется корочка металла, растущая от дна изложницы, толщину которой можно найти по формуле (для затвердевания первых порций перегретого металла коэффициент формы не учитывается)

$$\xi = k\sqrt{\tau}.$$

Для первых порций спокойной стали, имеющих значительный перегрев, коэффициент затвердевания составляет  $k = 16-18 \text{ мм/мин}^{1/2}$ . Принимаем  $k = 18 \text{ мм/мин}^{1/2}$ .

Тогда толщина нижней затвердевшей корки в донной части слитка составит

$$\xi = 18\sqrt{5} = 40 \text{ мм}$$

Толщина корочки затвердевшего металла у стенок изложницы зависит от времени контакта металла со стенками. Для упрощения задачи определим толщину затвердевшей корочки в средней части слитка. Считаем, что основную часть слитка наполняют с постоянной скоростью, тогда длительность затвердевания средней части слитка ( $\tau$ ) составит  $5/2 = 2,5$  мин.

Тогда толщина затвердевшей корки в средней части слитка составит

$$\xi = 18\sqrt{2,5} = 23,72 \text{ мм}.$$

Таким образом, средняя ширина жидкой части слитка составит  $790-2 \cdot 23,2 = 742,56$  мм; толщина  $630-2 \cdot 23,72=582,56$  мм; высота  $H=1900-40=1860$  мм. Тогда объем жидкой части слитка составит  $V_{\text{ж}} = 0,743 \cdot 0,583 \cdot 1,86=0,805 \text{ м}^3$ .

Коэффициент естественной усадки стали определяется содержанием углерода и для стали марки 50 при  $[C]=0,5 \%$  равен  $\alpha = 4 \%$ .

Тогда объем усадки металла основной части слитка составит

$$V_{\text{ур}} = \frac{0,805 \cdot 4}{100} = 0,0322 \text{ м}^3.$$

Относительный объем усадки металла основной части слитка

$$V_{\text{отн}} = \frac{0,0322}{0,946} \cdot 100 = 3,4\%.$$

Прибыльная часть слитка проектируется с целью компенсации естественной усадки металла основного тела слитка. Прибыльная часть слитка имеет высоту  $h = 400$  мм, среднюю ширину  $(700+740)/2=720$  мм и толщину  $(540+570)/2=555$  мм. Тогда объем прибыльной части составит  $V_{\text{приб}}=0,72 \cdot 0,55 \cdot 0,4=0,16$  м<sup>3</sup>, что в 5 раз больше естественной усадки стали основной части слитка.

При хорошей теплоизоляции прибыли и замедленном её наполнении, объема находящегося в ней жидкого металла будет достаточно для полной компенсации усадки стали в основной части слитка.

**Задача № 1.6.** Определить относительный объем усадочной раковины и ее глубину в 350-кг слитке стали марки 40, отлитом сифонным способом в течение 4 мин. Слиток имеет следующие размеры: высота  $h = 920$  мм; сечение верхней части  $215 \times 215$  мм, нижней  $245 \times 245$  мм.

Решение.

Относительный объем усадочной раковины можно определить из выражения

$$V_{\text{отн}} = \frac{V_{\text{ур}}}{V_{\text{слитка}}} \cdot 100.$$

Объем слитка определяем по формуле  $V_{\text{сл}}=A \cdot B \cdot H$ . Средняя ширина и толщина слитка  $(215+245)/2=230$  мм; высота слитка  $H=920$  мм. Тогда объем слитка  $V_{\text{сл}}=0,23 \cdot 0,23 \cdot 0,92=0,0487$  м<sup>3</sup>.

Объем усадочной раковины можно определить по уравнению

$$V_{\text{ур}} = \frac{V_{\text{жидк}} \cdot \alpha}{100}.$$

Усадочная раковина образуется вследствие естественной усадки металла находящегося в жидком виде после наполнения изложницы, то есть количество металла, затвердевшего за время наполнения изложницы необходимо исключить.

За время наполнения изложницы (4 мин) формируется корочка металла, растущая от дна изложницы, толщину которой можно найти по формуле (для затвердевания первых порций перегретого металла коэффициент формы не учитывается)

$$\xi = k\sqrt{\tau},$$

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

$\tau$  – продолжительность затвердевания, мин;

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

Для первых порций спокойной стали, имеющих значительный перегрев, коэффициент затвердевания принимаем равным  $k = 18$  мм/мин<sup>1/2</sup>.

Тогда толщина нижней затвердевшей корки составит

$$\xi = 18\sqrt{4} = 36\text{мм}.$$

Толщина корочки затвердевшего металла у стенок изложницы зависит от времени контакта металла со стенками, которое в свою очередь изменяется в зависимости от изменения скорости разливки (низ и верх изложницы наполняют медленнее). Для упрощения задачи определим толщину затвердевшей корочки в средней части слитка. Время затвердевания металла в этой части слитка можно приближенно определить по формуле

$$\tau > \frac{\tau_{\text{нап}}}{2} \text{ (так как верхнюю часть наполняют медленнее)}$$

Принимаем длительность затвердевания средней части слитка  $\tau > 4/2 = 2,5$  мин.

Тогда толщина затвердевшей корки в средней части слитка составит

$$\xi = 18\sqrt{2,5} = 28,5\text{мм}.$$

Таким образом, средняя ширина и толщина жидкой части слитка составит  $(215+245)/2 \cdot 2 \cdot 28,5 = 173$  мм; высота  $H = 920 - 36 = 884$ . Тогда объем жидкой части слитка  $V_{\text{сл}} = 0,173 \cdot 0,173 \cdot 0,884 = 0,0265$  м<sup>3</sup>.

Коэффициент естественной усадки стали определяется содержанием углерода и для стали марки 40 при  $[C] = 0,4$  % равен  $\alpha = 3,8$  %.

Тогда объем усадочной раковины составит

$$V_{\text{ур}} = \frac{0,0265 \cdot 3,8}{100} = 0,001\text{м}^3.$$

Относительный объем усадочной раковины

$$V_{\text{отн}} = \frac{0,001}{0,0487} \cdot 100 = 2,05\%.$$

Если считать усадочную раковину конусом, то ее объем можно найти из выражения

$$V_{\text{ур}} = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot h$$

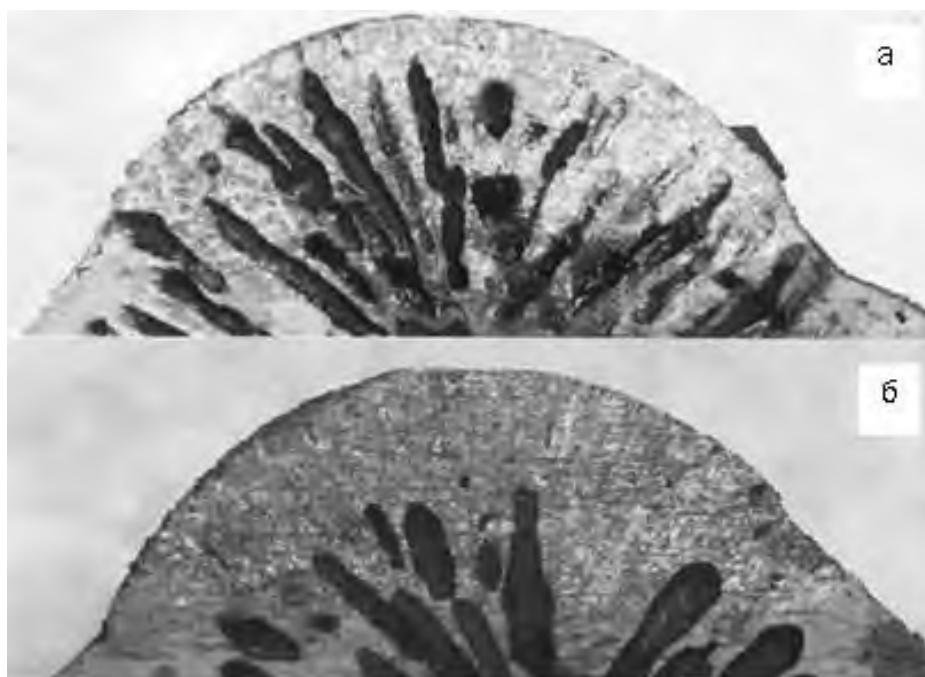
Диаметр усадочной раковины соответствует сечению верхней части слитка  $D = 215$  мм, тогда глубину ее составит

$$h = \frac{12 \cdot V_{\text{ур}}}{\pi \cdot D^2} = \frac{12 \cdot 0,001}{3,14 \cdot 0,215^2} = 0,082\text{м}.$$

Таким образом, слиток стали, разлитый в изложницу без прибыльной надставки, будет поражен открытой усадочной раковиной на 82 мм, что составляет 9 % высоты слитка.

#### 1.4 Определение параметров качества слитка кипящей стали

Одним из главных критериев качества слитка кипящей стали является толщина поверхностной корки плотного металла, которую называют «здоровой» коркой. Корка плотного металла (рис. 7) отделяет сотовые пузыри от поверхности слитка кипящей стали и предохраняет их от окисления в период нагрева слитка «под прокатку».



Риснок 7 – 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 недостаточной толщине «здоровой» корки в слитке возможно вскрытие сотовых пузырей и окисление их внутренней поверхности кислородом воздуха. В дальнейшем 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.

**Задача № 1.7.** Вычислить среднюю толщину поверхностной корки плотного металла и среднее расстояние до вторичных пузырей в 9-т слитках стали марки 08кп, отлитых в течение 1,5...5 мин и закупоренных крышкой через 18...20 мин после окончания отливки.

Слиток имеет следующие размеры: высота  $h = 2200$  мм; ширина верхней части  $b_v = 1520$  мм, нижней  $b_n = 1560$  мм; толщина верхней части  $a_v = 750$  мм, нижней  $a_n = 850$  мм.

Решение.

Толщину поверхностной корки плотного металла в изложнице приближенно можно определить по формуле (при формировании поверхностной корки коэффициент формы слитка можно не учитывать):

$$\xi = k\sqrt{\tau},$$

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

$\tau$  – продолжительность затвердевания, мин;

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

Для первых порций кипящей стали, имеющих значительный перегрев, коэффициент затвердевания принимается равным  $k = 15$  мм/мин<sup>1/2</sup>.

Корка плотного металла в слитка кипящей стали формируется при условии низкого ферростатического давления на глубине не более 1 метра от поверхности металла в изложнице. На практике это означает, что «здоровая» корка формируется только в период наполнения изложницы.

Средняя толщина поверхностной корки плотного металла будет иметь место в середине слитка по прошествии примерно половины длительности наполнения изложницы, поэтому продолжительность формирования поверхностной корки будет равна 1,5/2...5/2 мин.

Тогда

$$\xi_1 = 15\sqrt{\frac{1,5}{2}} = 13\text{мм}; \quad \xi_1 = 15\sqrt{\frac{5}{2}} = 23,7\text{мм}.$$

После образования поверхностной корки плотного металла начинает формироваться зона сотовых пузырей, а вторичные округлые пузыри образуются в момент закупоривания слитка, поэтому расстояние до вторичных пузырей будет складываться из толщина поверхностной корки твердого металла  $\xi$  и толщины металла, затвердевшего за время от окончания разливки до момента закупоривания –  $\delta$ :  $l_{\text{втор}} = \xi + \delta$ , где  $\delta = k\sqrt{\tau}$ .

Условия затвердевания у фронта кристаллизации после формирования твердой поверхностной корочки изменяются – металл находящийся у фронта кристаллизации имеет минимальный перегрев, поэтому коэффициент затвердевания кипящей стали можно принять равным  $k = 23 \text{ мм/мин}^{1/2}$ .

Тогда

$$\delta_1 = 23\sqrt{18} = 97,6\text{мм}; \quad \delta_2 = 23\sqrt{20} = 103\text{мм}.$$

Таким образом, среднее расстояние до вторичных пузырей составит

– при длительности разливки 1,5 мин -  $l_{\text{втор}} = 13 + 97,6 = 111\text{мм}$ ;

– при длительности разливки 5 мин -  $l_{\text{втор}} = 23,7 + 103 = 127\text{мм}$ .

### 1.5 Определение параметров качества слитка полуспокойной стали

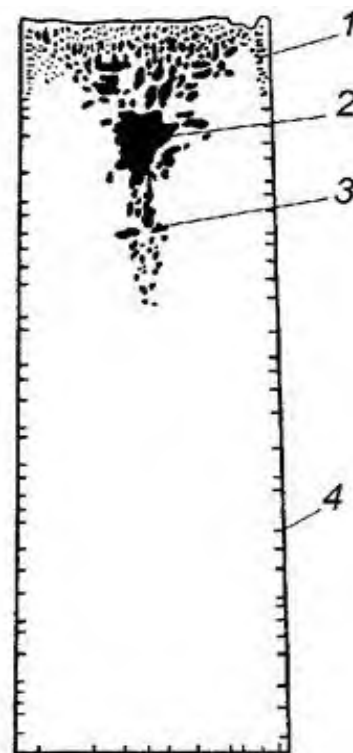
Полуспокойная сталь по степени раскисленности занимает промежуточное положение между спокойной и кипящей сталью. Из-за наличия избыточного кислорода в процессе разливки полуспокойной стали наблюдается «искрение», вызванное протекаем реакции окисления углерода. Длительность искрения служит показателем оптимальной степени раскисленности стали и должна составлять 10-40 с.

Поскольку интенсивность газообразования низкая, то образующиеся пузыри не успевают удалиться в газовую фазу и остаются в структуре металла на поверхности слитка – «поверхностные пузыри» (подкорковые пузыри).

Глубина проникновения поверхностных пузырей в слиток определяются степенью раскисленности стали и скоростью разливки.

Учитывая, что подавить газообразование при разливке полуспокойной стали невозможно, одним из требований к качеству слитка полуспокойной стали является ограничение глубины залегания подкорковых пузырей – не более 5 мм. В этом случае поверхностный слой металла, пораженный подкорковыми пузырями, переходит в окалину в процессе нагрева слитка под прокатку.

При оптимальной степени раскисленности полуспокойной стали единственным способом подавления газообразования и развития подкорковых пузырей является увеличение скорости разливки, поэтому полуспокойную сталь рекомендуется разливать с максимально возможной скоростью, исключая образование продольных горячих трещин.



1 – сотовые (округлые) пузыри; 2 – усадочная раковина; 3 – усадочная рыхлость; 4 – подкорковые пузыри  
Рисунок 8 – Схема строения слитка полуспокойной стали

**Задача № 1.8.** Вычислить толщину слоя металла, пораженного поверхностными пузырями в 9-т слитке стали марки 08пс, отлитого сверху со скоростью 2,8 м/мин.

Решение.

Поверхностные пузыри в слитке полуспокойной стали образуются в процессе наполнения изложницы в результате развития реакции окисления углерода, сопровождающейся газообразованием. Глубина, в пределах которой возможно газообразование при оптимальной раскисленности полуспокойной стали составляет 20-30 см. Толщину слоя металла, пораженного поверхностными пузырями при разливке полуспокойной стали можно определить, как толщину поверхностной корки твердого металла по закону квадратного корня (для формирования поверхностной корки коэффициент формы не учитывается):

$$\xi = k\sqrt{\tau},$$

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

$\tau$  – продолжительность затвердевания, мин;

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

Продолжительность затвердевания металла можно определить из выражения

$$\tau = \frac{h}{W},$$

где  $h$  – высота зоны газообразования, м;

$W$  – скорость разливки, м/мин.

Упрощенно можно считать, что поверхностные пузыри образуются в течение наполнения зоны пониженного ферростатического давления – зоны газообразования. Принимаем ее высоту –  $h_r = 0,25$  м, тогда при коэффициенте затвердевания перегретого металла – 15 мм/мин<sup>0,5</sup> толщина корковой зоны, пораженной пузырями, составит

$$\xi = k\sqrt{\frac{h_r}{W}} = 15\sqrt{\frac{0,25}{2,8}} = 4,5 \text{ мм.}$$

Таким образом, разливка полуспокойной стали со скоростью 2,8 м/мин обеспечивает удовлетворительное качество слитка.

## 1.6 Расчеты скорости наполнения изложниц

Наиболее важными параметрами, влияющими на качество слитков, являются



ся температура жидкой стали и скорость разливки металла. Различают массовую и линейную скорость разливки стали. Массовая скорость разливки – это масса стали, поступающая в изложницу в единицу времени (т/мин). Линейная скорость разливки позволяет оценить динамику подъема металла в изложнице и определяется величиной подъема уровня металла за единицу времени. Линейная скорость металла может колебаться в достаточно большом диапазоне значений: от 0,1 м/мин до 5 м/мин в зависимости от условий разливки. С целью снижения длительности разливки плавки стараются разливать сталь с максимальной скоростью, которая ограничивается условиями достижения минимального количества поверхностных дефектов. Факторами, ограничивающими скорость разливки являются:

- повышение вероятности образования продольных горячих трещин;
- снижение толщины «здоровой» корочки в слитках кипящей стали;
- снижение качества поверхности (повышенное пленообразование) при разливке сверху.

Для стали каждой марки и для каждой массы слитка существуют оптимальная температура и оптимальная скорость разливки, обеспечивающие получение минимального общего брака по поверхностным дефектам.

Значения указанных параметров определяют экспериментальным путём на основании производственного опыта.

**Задача № 1.9.** Определить скорость наполнения изложницы металлом в начале, середине и в конце разливки плавки из 160-т сталеразливочного ковша стали марки Ст.3сп на слитки массой 7,8 т через разливочный стакан диаметром 40 мм. Размеры слитка из задачи № 1.2. Разливка ведется полной струей.

**Решение.**

Скорость наполнения изложницы металлом (м/мин) при разливке сверху будет определяться скоростью разливки стали из сталеразливочного ковша (т/мин), массой (т) и высотой слитка.

Скорость разливки металла из сталеразливочного ковша зависит от высоты металла в ковше ( $h_m$ , м) и диаметра разливочного стакана ( $d$ , мм) по формуле:

$$q = 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot d^2 \cdot \sqrt{h_m}.$$

Высоту металла в сталеразливочном ковше можно определить исходя из известной его емкости, плотности жидкого металла и конструктивных особенностей. Объем металла в 160-т ковше при плотности стали 6,9 т/м<sup>3</sup> составит

$$V_m = \frac{160}{6,9} = 23,19 \text{ м}^3.$$

Объем сталеразливочного ковша приближенно можно найти из выражения

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h.$$

Тогда, при отношении высоты к диаметру сталеразливочных ковшей  $h/D = 1,25$ , высота металла в полном ковше составит

$$V = 0,5 \cdot h^3 \Rightarrow h = \sqrt[3]{\frac{23,19}{0,5}} = 3,6 \text{ м}$$

В начале разливки при  $h_m = 3,6$  м скорость разливки ( $q$ , т/мин) составит

$$q = 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 40^2 \cdot \sqrt{3,6} = 3,63 \text{ т/мин.}$$

При такой скорости разливки металла время наполнения 7,8-т изложницы составит

$$\tau_{\text{нап}} = \frac{M_{\text{сл}}}{q} = \frac{7,8}{3,63} = 2,14 \text{ мин.}$$

При высоте слитка  $h_{\text{сл}} = 2,3$  м скорость наполнения изложницы металлом в начале разливки составит

$$W = \frac{h_{\text{сл}}}{\tau_{\text{нап}}} = \frac{2,3}{2,14} = 1,07 \text{ м/мин.}$$

В середине разливки при высоте металла в ковше  $h_m = 3,6/2 = 1,8$  м скорость разливки составит

$$q = 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 40^2 \cdot \sqrt{1,8} = 2,58 \text{ т/мин.}$$

При такой скорости разливки металла время наполнения 7,8-т изложницы составит

$$\tau_{\text{нап}} = \frac{M_{\text{сл}}}{q} = \frac{7,8}{2,58} = 3,02 \text{ мин.}$$

При высоте слитка  $h_{\text{сл}} = 2,3$  м скорость наполнения изложницы металлом в начале разливки составит

$$W = \frac{h_{\text{сл}}}{\tau_{\text{нап}}} = \frac{2,3}{3,02} = 0,76 \text{ м/мин.}$$

Разливку на годные слитки завершают при минимальном остаточном уровне металла в ковше – 0,5-0,6 м, поэтому в конце разливки плавки при остаточном уровне металла в ковше  $h_m = 0,6$  м скорость разливки составит

$$q = 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 40^2 \cdot \sqrt{0,6} = 1,49 \text{ т/мин.}$$

При такой скорости разливки металла время наполнения 7,8-т изложницы составит

$$\tau_{\text{нап}} = \frac{M_{\text{сл}}}{q} = \frac{7,8}{1,49} = 5,23 \text{ мин.}$$

При высоте слитка  $h_{сл} = 2,3$  м скорость наполнения изложницы металлом в начале разливки составит

$$W = \frac{h_{сл}}{\tau_{нап}} = \frac{2,3}{5,23} = 0,44 \text{ м/мин.}$$

Таким образом, при разливке стали без регулирования интенсивности выдачи металла из сталеразливочного ковша (полной струей), скорость наполнения изложниц изменяется от 1,07 м/мин в начале разливки до 0,44 м/мин в конце разливки, то есть снижается более чем в 2 раза.

**Задача № 1.10.** Рассчитать скорость наполнения изложниц металлом при отливке сифонным способом средних по порядку разливки слитков массой 6 т ( $h_{сл}=2,1$  м) стали марки 40Х из 100-т сталеразливочного ковша через стакан диаметром 60 мм (на поддоне находится 4 изложницы). Разливка производится через полностью открытый шиберный затвор.

Решение.

Скорость разливки металла из сталеразливочного ковша зависит от высоты металла в ковше ( $h_m$ , м) и диаметра разливочного стакана ( $d$ , мм) по формуле:

$$q = 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot d^2 \cdot \sqrt{h_m}.$$

Объем металла в 100-т ковше при плотности стали 7 т/м<sup>3</sup> составит

$$V_m = \frac{100}{7} = 14,29 \text{ м}^3.$$

Объем сталеразливочного ковша приближенно можно найти из выражения

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h.$$

Тогда, при отношении высоты к диаметру сталеразливочных ковшей  $h/D = 1,25$ , высота металла в полном ковше составит

$$V = 0,5 \cdot h^3 \Rightarrow h = \sqrt[3]{\frac{14,29}{0,5}} = 3 \text{ м}$$

При наполнении средних по порядку разливки изложниц высота металла в 100-т ковше составляет  $h_m = 3/2 = 1,5$  м, тогда скорость разливки металла из ковша через стакан диаметром 60 мм составит

$$q = 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 60^2 \cdot \sqrt{1,5} = 7,5 \text{ т/мин.}$$

Поскольку наполняются сразу четыре изложницы, то скорость поступления металла в изложницу составляет  $q_{изл} = 7,5/4 = 1,9$  т/мин.

При такой скорости разливки металла время наполнения 6-т изложницы составит

$$\tau_{\text{нап}} = \frac{M_{\text{сл}}}{q} = \frac{6}{1,9} = 3,16 \text{ мин.}$$

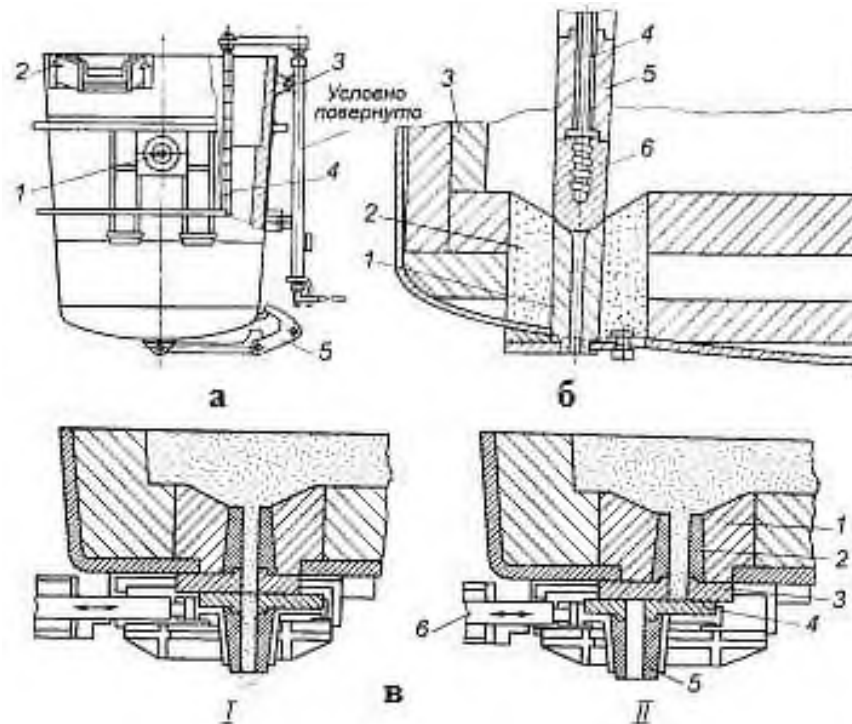
При высоте слитка  $h_{\text{сл}} = 2,1$  м скорость наполнения изложницы металлом в середине разливки составит

$$W = \frac{h_{\text{сл}}}{\tau_{\text{нап}}} = \frac{2,1}{3,16} = 0,66 \text{ м/мин.}$$

### 1.7 Расчеты диаметра канала разливочного стакана стальной ковша

Для разливки стали из ковша по изложницам служит стакан со стопором или шиберным (скользящим) затвором.

Стакан, через который жидкая сталь вытекает из ковша, вставляют в днище ковша в специальный гнездовой кирпич (рис. 9, б и в).



**а – общий вид** (1 – цапфа; 2 – носок для слива шлака; 3 – стопорный механизм; 4 – стопор; 5 – скоба для кантования ковша); **б – установка стопора и стакана в ковше** (1 – стакан; 2 – гнездовой кирпич; 3 – кладка ковша; 4 – стержень стопора; 5 – катушка; 6 – пробка);

**в – шиберный затвор в открытом (I) и закрытом (II) положениях** (1 – гнездовой кирпич; 2 – разливочный стакан; 3 – неподвижная плита; 4 – подвижная плита; 5 – стакан коллектор; 6 – шток гидроцилиндра)

Рисунок 9 – Сталеразливочный ковш

Стакан имеет форму усеченного конуса с отверстием круглого сечения диа-

метром 25-120 мм. Высота стаканов в зависимости от емкости ковша равна 120-440 мм. Наибольшее распространение получили стаканы из магнезита.

Стопор служит для закрывания и открывания отверстия стакана. Он представляет собой (см. рис. 9, в) металлический стержень диаметром 40—60мм, защищенный от воздействия жидкой стали и шлака шамотными катушками с огнеупорной пробкой на конце. Для подъема и опускания стопора служит стопорный рычажный механизм (см. рис. 9, а)

Главными недостатками стопорного устройства были высокий расход огнеупоров, большой объем работ по подготовке стопоров и частые аварии при разливке (приваривание и отрыв пробки, деформация и передедание стопора и др.). Поэтому в современном сталеплавильном производстве применяют сталеразливочные ковши, оборудованные шибберными затворами (рис. 9, в). Плиты шибберного затвора из корунда или периклаза позволяют разливать до трех плавов, обеспечивая надежное функционирования в процессе разливки большегрузных плавов.

**Задача № 1.11.** Определить диаметр канала стакана в 300-т сталеразливочном ковше для разливки сверху стали марки 09Г2С на слитки массой 20т ( $h=2,34$  м). Наилучшее качество слитка получается при скорости наполнения изложницы 0,6-0,8 м/мин. Разливка ведется открытой струей.

Решение.

Скорость разливки металла из сталеразливочного ковша зависит от высоты металла в ковше ( $h_m$ , м) и диаметра разливочного стакана ( $d$ , мм) по формуле:

$$q = 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot d^2 \cdot \sqrt{h_m}.$$

Из этого выражения можно вывести формулу для определения внутреннего диаметра разливочного стакана

$$d = \sqrt{\frac{q}{1,2 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{h_m}}}.$$

Объем металла в 300-т ковше при плотности стали 7 т/м<sup>3</sup> составит

$$V_m = \frac{300}{7} = 42,86 \text{ м}^3.$$

Объем сталеразливочного ковша приближенно можно найти из выражения

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h.$$

Тогда, при отношении высоты к среднему диаметру сталеразливочных ковшей  $h/D = 1,25$ , высота металла в полном ковше составит

$$V = 0,5 \cdot h^3 \Rightarrow h = \sqrt[3]{\frac{42,86}{0,5}} = 4,4 \text{ м}$$

Наилучшее качество слитка получается при скорости наполнения изложницы 0,6-0,8 м/мин. Учитывая, что разливка ведется открытой струей, для реализации благоприятных условий разливки для большего количества слитков необходимо выполнять расчет диаметра канала разливочного стакана на середину разливки плавки. Поэтому принимаем высоту металла в 300-т ковше равной  $h_M = 4,4/2 = 2,2$  м.

При средней скорости наполнения изложницы  $W = 0,7$  м/мин и высоте слитка  $h_{сл} = 2,34$  м продолжительность наполнения изложницы составит

$$\tau_{нап} = \frac{h_{сл}}{W} = \frac{2,34}{0,7} = 3,34 \text{ мин.}$$

Тогда скорость разливки металла из сталеразливочного ковша ( $q$ , т/мин) должна составлять

$$q = \frac{M_{сл}}{\tau_{нап}} = \frac{20}{3,34} = 5,99 \text{ т/мин.}$$

При такой скорости разливки и высоте металла в ковше в середине разливки плавки  $h_M = 2,2$  м диаметр стакана должен составлять

$$d = \sqrt{\frac{q}{1,2 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{h_M}}} = \sqrt{\frac{5,99}{1,2 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{2,2}}} = 57,97 \text{ мм} \approx 60 \text{ мм.}$$

**Задача № 1.12.** Рассчитать диаметр канала стакана для разливки сифоном стали марки 40 из 130-т сталеразливочного ковша на слитки массой 5т ( $h_{сл} = 2$  м, на каждом поддоне по 4 изложницы). Наилучшее качество слитков получается при скорости наполнения изложницы 0,3-0,5 м/мин. Недостающие данные принять самостоятельно.

Решение.

Диаметр разливочного стакана определяется по уравнению (см. задачу № 11):

$$d = \sqrt{\frac{q}{1,2 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{h_M}}}$$

Наилучшее качество слитка получается при скорости наполнения изложницы 0,3-0,5 м/мин. Учитывая, что разливка ведется сифонным способом, позволяющим контролировать скорость наполнения изложниц, расчет диаметра канала разливочного стакана будем вести на конец разливки плавки, когда скорость разливки минимальна, и разливка ведется открытой струей. В другие периоды

разливки скорость выдачи металла регулируется запорным устройством – стопорным или шиберным.

Поэтому принимаем высоту металла в ковше, при которой завершается разливка стали на годные слитки, из диапазона 0,5-0,6 м –  $h_m = 0,5$  м.

При средней скорости наполнения изложницы 0,4 м/мин и высоте слитка  $h_{сл} = 2$  м оптимальная продолжительность наполнения изложницы составит

$$\tau_{нап} = \frac{h_{сл}}{W} = \frac{2}{0,4} = 5 \text{ мин.}$$

Тогда скорость разливки металла в изложницу ( $q$ , т/мин) должна составлять

$$q = \frac{M_{сл}}{\tau_{нап}} = \frac{5}{5} = 1 \text{ т / мин.}$$

Поскольку на поддоне 4 изложницы то суммарная скорость разливки стали из сталеразливочного ковша должен составлять  $q_{\Sigma} = 4 \cdot q = 4 \cdot 1 = 4$  т/мин.

При такой скорости разливки и расчетной высоте металла в ковше на конец разливки равной  $h_m = 2,2$  м, диаметр стакана должен равняться

$$d = \sqrt{\frac{q_{\Sigma}}{1,2 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{h_m}}} = \sqrt{\frac{4}{1,2 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{0,5}}} = 68,7 \text{ мм.}$$

**Задача № 1.13.** Определить диаметры каналов стаканов сталеразливочного и промежуточного ковшей при разливке сверху стали марки 20ХГНМ на слитки массой 9 т (Высота слитка = 2,3 м). Вместимость сталеразливочного ковша составляет 250 т, промежуточный ковш предназначен для наполнения сразу трех изложниц. Наилучшее качество поверхности получается при наполнения изложницы со скоростью 0,5-0,6 м/мин.

Решение.

Диаметры разливочных стаканов сталеразливочного ( $d_{с.к.}$ , мм) и промежуточного ( $d_{п.к.}$ , мм) ковшей определяются по уравнениям:

$$d_{с.к.} = \sqrt{\frac{q_{с.к.}}{1,2 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{h_{с.к.}}}}; \quad d_{п.к.} = \sqrt{\frac{q_{п.к.}}{1,1 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{h_{п.к.}}}}.$$

Наилучшее качество слитка получается при скорости наполнения изложницы 0,5-0,6 м/мин. Разливка ведется через промежуточный ковш, призванный не только распределять металл по нескольким изложницам, но и поддерживать небольшой и постоянный напор струи, подаваемой в изложницу. Поэтому промежуточный ковш нет необходимости оборудовать запорными устройствами, а поддержание постоянного уровня металла в нем ( $h_{п.к.} = 0,8-1,2$  м) обеспечивается регулированием степени открытия затвора на сталеразливочном ковше. В этом случае, для поддержания постоянной средней скорости наполнения изложницы

0,5 м/мин, расчет диаметров каналов сталеразливочного и промежуточного ковшей следует вести на конец разливки плавки, когда скорость разливки минимальна, и разливка из стальковша ведется открытой струей.

Поэтому принимаем расчетную высоту металла в 250-т сталеразливочном ковше  $h_{с.к.} = 0,5$  м, а в промежуточном -  $h_{п.к.} = 1,0$  м.

При средней скорости наполнения изложницы 0,5 м/мин и высоте слитка  $h_{сл} = 2,3$  м продолжительность наполнения составит

$$\tau_{нап} = \frac{h_{сл}}{W} = \frac{2,3}{0,5} = 4,6 \text{ мин.}$$

Тогда скорость разливки металла из промежуточного ковша в одну изложницу должна составлять

$$q_{п.к.} = \frac{M_{сл}}{\tau_{нап}} = \frac{9}{4,6} = 1,96 \text{ т/мин.}$$

Поскольку промежуточный ковш предназначен для наполнения сразу трех изложниц, то скорость разливки металла из сталеразливочного ковша в промежуточный  $q_{\Sigma} = 3 \cdot 1,96 = 5,88$  т/мин.

При такой скорости разливки и высоте металла в промежуточном ковше 0,8 м диаметр стакана должен быть

$$\text{- для пром. ковша } d_{п.к.} = \sqrt{\frac{1,96}{1,1 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{1,0}}} = 42,21 \text{ мм} \approx 45 \text{ мм;}$$

$$\text{- для сталь. ковша } d_{с.к.} = \sqrt{\frac{5,88}{1,2 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{0,5}}} = 83,24 \text{ мм} \approx 85 \text{ мм.}$$

**Задача № 1.14.** Определить диаметр канала стакана для разливки сверху стали марки 08кп из 280-т сталеразливочного ковша на слитки массой 18 т. Высота слитка 2,1 м.

Решение.

Диаметр разливочного стакана сталеразливочного ковша определяется по уравнению:

$$d = \sqrt{\frac{q}{1,2 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{h_M}}}$$

Качество слитка кипящей стали характеризуется толщиной здоровой корочки, которая, в зависимости от массы слитка, должна составлять не менее 10-15 мм. Более тонкая корка окисляется при нагреве слитков перед прокаткой. В результате содовые пузыри обнажаются, их поверхность окисляется, поэтому они не завариваются при прокатке, а на поверхности проката образуются рванины



(сотовая рвань).

Здоровая корка формируется во время наполнения изложницы металлом и ее толщина определяется интенсивностью кипения стали в этот период. Интенсивность кипения и толщина здоровой корки будут тем больше, чем выше окисленность жидкой стали и ниже скорость её наполнения.

При разливке сверху контролировать скорость наполнения изложниц затруднительно, поэтому разливку обычно ведут открытой струей. В этих условиях, во избежание получения недостаточной толщины здоровой корочки, расчет скорости разливки и диаметра разливочного стакана необходимо вести на начало разливки плавки, когда напор струи и интенсивность выдачи металла из ковша максимальны.

Объем металла в 280-т ковше при плотности стали  $7 \text{ т/м}^3$  составит

$$V_M = \frac{280}{7} = 40 \text{ м}^3.$$

Объем сталеразливочного ковша приближенно можно найти из выражения

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h.$$

Тогда, при отношении высоты к среднему диаметру сталеразливочных ковшей  $h/D = 1,25$ , высота металла в полном ковше составит

$$V = 0,5 \cdot h^3 \Rightarrow h = \sqrt[3]{\frac{V}{0,5}} = 4,3 \text{ м.}$$

Таким образом, расчет диаметра стакана стальной ковша будем вести на начало разливки –  $h_M = 4,3 \text{ м}$ .

Для качественного слитка  $M_{\text{сл}} = 18 \text{ т}$ , толщина здоровой корочки плотного металла обычно составляет  $10 \dots 15 \text{ мм}$ . Принимаем  $\xi = 13 \text{ мм}$ .

Толщину здоровой корочки при разливке кипящей стали можно определить по закону квадратного корня

$$\xi = k\sqrt{\tau},$$

где  $\xi$  – толщина закристаллизовавшегося металла (здоровой корочки), мм;

$\tau$  – продолжительность затвердевания, мин;

$k$  – коэффициент затвердевания,  $\text{мм/мин}^{0,5}$ .

Продолжительность затвердевания металла можно определить из выражения

$$\tau = \frac{h_{\text{кп}}}{W},$$

где  $h_{\text{кп}}$  – высота области кипения, м;

$W$  – скорость наполнения изложницы, м/мин.

При нормальной окисленности кипящей стали кипение металла происходит на глубину около 1 м, поэтому  $h_{\text{кп}} = 1,0$  м. Тогда при коэффициенте затвердевания перегретого металла –  $15 \text{ мм/мин}^{0,5}$ , в результате расчетов получим

$$\xi = k \sqrt{\frac{h_{\text{кп}}}{W}} \Rightarrow W = \frac{h_{\text{кп}} \cdot k^2}{\xi^2} = \frac{1,0 \cdot 15^2}{13^2} = 1,33 \text{ м/мин.}$$

При такой скорости наполнения изложницы и высоте слитка  $h_{\text{сл}} = 2,1$  м продолжительность наполнения изложницы составит

$$\tau_{\text{нап}} = \frac{h_{\text{сл}}}{W} = \frac{2,1}{1,33} = 1,58 \text{ мин.}$$

Тогда скорость разливки металла из сталеразливочного ковша должна составлять

$$q = \frac{M_{\text{сл}}}{\tau_{\text{нап}}} = \frac{18}{1,58} = 11,39 \text{ т/мин.}$$

При такой скорости разливки и высоте металла в полном сталеразливочном ковше 4,3 м диаметр стакана должен составлять

$$d = \sqrt{\frac{q}{1,2 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{h_{\text{м}}}}} = \sqrt{\frac{11,39}{1,2 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{4,05}}} = 67,7 \text{ мм} \approx 70 \text{ мм.}$$

**Задача № 1.15.** Определить диаметр канала стакана для разливки сверху стали марки 10пс из 220-т сталеразливочного ковша на слитки массой 8,8-т (высота слитка = 2,3 м).

Решение.

Диаметр разливочного стакана сталеразливочного ковша определяется по уравнению:

$$d = \sqrt{\frac{q}{1,2 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{h_{\text{м}}}}}.$$

При нормальной степени раскисленности полуспокойной стали в макроструктуре слитка можно выделить зону округлых подкорковых пузырей, располагающихся на поверхности слитка; зону поверхностных сотовых пузырей, расположенных на поверхности верхней части слитка (на высоте 20-30 см) и осевую усадочную рыхлость, доходящую до 35-45 % высоты слитка (см. рис. 8). Сотовые пузыри на поверхности в верхней части слитка большой опасности не представляют, поскольку эта часть слитка переходит в головную обрезь. Наибольшую опасность представляют подкорковые пузыри, располагающиеся по всей поверхности слитка: если глубина их залегания превышает 5 мм, то при нагреве

под прокатку пораженный пузырями слой окисляется не полностью, в результате чего на поверхности проката формируется дефект, называемый рванина.

При нормальной степени раскисленности глубина залегания подкорковых пузырей определяется условиями газовыделения, то есть зависит от скорости наполнения изложницы. С повышением скорости наполнения условия газовыделения ухудшаются, поэтому полуспокойную сталь рекомендуется разливать с повышенной скоростью. Для того, чтобы это условие выполнялось на протяжении разливки всей плавки, необходимо вести расчет диаметра стакана на конец плавки, когда скорость разливки минимальна. Минимальный уровень металла в сталеразливочном ковше, при котором производят наполнение изложниц, составляет 0,5-0,6 м. Принимаем расчетный уровень металла в сталеразливочном ковше  $h_m = 0,6$  м.

Поверхностные пузыри формируются в течении времени наполнения изложницы на высоту, при которой возможно протекание реакции окисления углерода – высоты «газообразования», составляющей при нормальном уровне раскисленности полуспокойной стали 20-30 см. Тогда, продолжительность формирования зоны подкорковых пузырей можно найти из выражения

$$\tau = \frac{h_r}{W},$$

где  $h_r$  – высота области газовыделения, м;

$W$  – скорость разливки, м/мин.

Толщину слоя металла, пораженного поверхностными пузырями при разливке полуспокойной стали можно определить по закону квадратного корня

$$\xi = k\sqrt{\tau},$$

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

$\tau$  – продолжительность затвердевания (формирования зоны подкорковых пузырей), мин;

$k$  – коэффициент затвердевания, мм/мин<sup>0,5</sup>.

Для исключения образования на поверхности проката рванин необходимо, чтобы толщину слоя металла, пораженного поверхностными пузырями не превышала 5 мм, тогда он при нагреве под прокатку и зачистке переходит в окалину. Таким образом, принимаем  $\xi = 5$  мм.

Поскольку поверхностные пузыри образуются в течение наполнения зоны газовыделения, составляющей 20-30 см, принимаем ее высоту –  $h_r = 0,25$  м.

Тогда, при коэффициенте затвердевания перегретой полуспокойной стали  $k = 15 \text{ мм/мин}^{0,5}$  минимальная скорость наполнения изложницы составит

$$\xi = k \sqrt{\frac{h_{\Gamma}}{W}} \Rightarrow W = \frac{h_{\Gamma} \cdot k^2}{\xi^2} = \frac{0,25 \cdot 15^2}{5^2} = 2,25 \text{ м/мин.}$$

При такой скорости наполнения и высоте слитка  $h_{\text{сл}} = 2,3 \text{ м}$ , продолжительность наполнения составит

$$\tau_{\text{нап}} = \frac{h_{\text{сл}}}{W} = \frac{2,3}{2,25} = 1,02 \text{ мин.}$$

Тогда скорость разливки металла из сталеразливочного ковша должна составлять

$$q = \frac{M_{\text{сл}}}{\tau_{\text{нап}}} = \frac{8,8}{1,02} = 8,63 \text{ т/мин.}$$

При такой скорости разливки и высоте металла в сталеразливочном ковше в конце разливки  $0,6 \text{ м}$  диаметр стакана должен составлять

$$d = \sqrt{\frac{q}{1,2 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{h_{\text{м}}}}} = \sqrt{\frac{8,63}{1,2 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{0,6}}} = 96,4 \text{ мм} \approx 100 \text{ мм.}$$

## 1.8 Расчеты продолжительности разливки плавки в изложницы

При расчете разливочного оборудования и организации разливки необходимо учитывать фактор продолжительности разливки плавки, который влияет не только на задействованность разливочного оборудования, но, главным образом, влияет на требуемый перегрев металла в ковше перед началом разливки, а, следовательно, и на энергетические затраты на передел.

**Задача № 1.16.** Сталь марки 15 разливается из 320-т сталеразливочного ковша сверху через два стакана диаметром 60 мм на слитки 12т. Вычислить продолжительность разливки металла всей плавки. Первые  $\frac{3}{4}$  длительности разливки проводятся открытой струей одновременно в 2 изложницы, последняя  $\frac{1}{4}$  длительности разливки – открытой струей через один разливочный стакан.

Решение.

Скорость разливки металла из сталеразливочного ковша (т/мин) через один разливочный стакан зависит от высоты металла в ковше ( $h_{\text{м}}$ , м) и диаметра разливочного стакана ( $d$ , мм) по формуле:

$$q = 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot d^2 \cdot \sqrt{h_{\text{м}}}.$$

Объем металла в 320-т ковше при плотности стали  $7 \text{ т/м}^3$  составит

$$V_M = \frac{320}{7} = 45,71 \text{ м}^3.$$

Объем сталеразливочного ковша приближенно можно найти из выражения

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h.$$

Тогда, при отношении высоты к среднему диаметру сталеразливочных ковшей  $h/D = 1,25$ , высота металла в полном ковше составит

$$V = 0,5 \cdot h^3 \Rightarrow h = \sqrt[3]{\frac{V}{0,5}} = 4,5 \text{ м.}$$

Разливка на годные слитки завершается при остаточном уровне металла в ковше 0,5-0,6 м – принимаем 0,5 м. Тогда за время разливки уровень металла в ковше падает с 4,5 до 0,5 м, то есть на 4 м. Если считать, что уровень металла в ковше снижается линейно, то в первые  $\frac{3}{4}$  длительности разливки он снижается на  $\frac{3}{4} \cdot 4 = 3$  м, то есть с 4,5 до 1,5 м, составляя в среднем 3 метра. В последней четверти разливки уровень металла снижается с 1,5 до 0,5 м, составляя в среднем 1 м.

Тогда, скорость разливки металла через один стакан в первые  $\frac{3}{4}$  разливки составит

$$q = 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 60^2 \cdot \sqrt{3} = 7,48 \text{ т/мин.}$$

Поскольку сталь разливается одновременно в 2 изложницы, то суммарная скорость разливки в этот период составит  $7,48 \cdot 2 = 14,96$  т/мин.

В последней четверти разливки при среднем уровне металла в ковше  $h_M = 0,7$  м, скорость разливки через один стакан составит

$$q = 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 60^2 \cdot \sqrt{1} = 4,32 \text{ т/мин.}$$

Тогда средняя для всей плавки скорость разливки

$$q = \frac{3}{4} \cdot 14,96 + \frac{1}{4} \cdot 4,32 = 12,3 \text{ т/мин.}$$

При такой скорости разливки металла время разливки 320-т ковша (без учета времени на его переезды) составит

$$\tau_{\text{нап}} = \frac{M_{\text{плавк}}}{q} = \frac{320}{12,3} = 26 \text{ мин.}$$

**Задача № 1.17.** Сталь марки 40 разливается из 130-т сталеразливочного ковша сифонным способом (одновременно в 4 изложницы) через стакан диаметром 70 мм на слитки массой 5 т, высотой 2,1 м. Разливка ведется таким образом, чтобы обеспечивалась оптимальная скорость наполнения изложницы – 0,3-0,5 м/мин. Вычислить продолжительность разливки металла всей плавки.

### Решение.

Поскольку в процессе разливки поддерживается постоянная скорость наполнения изложницы (принимая ее равной 0,4 м/мин), то можно определить время наполнения изложниц, установленных на одном поддоне

$$\tau_{\text{нап}} = \frac{h_{\text{сл}}}{W} = \frac{2,1}{0,4} = 5,25 \text{ мин.}$$

За это время наполняется сразу 4 изложницы, поэтому средняя скорость разливки из ковша составит

$$q_{\text{разл}} = \frac{4 \cdot M_{\text{сл}}}{\tau_{\text{нап}}} = \frac{4 \cdot 5}{5,25} = 3,8 \text{ т/мин.}$$

При такой скорости разливки металла время разливки 130-т ковша (без учета времени на его переезды) составит

$$\tau_{\text{разл}} = \frac{M_{\text{шлак}}}{q} = \frac{130}{3,8} = 34 \text{ мин.}$$

## **1.9 Задачи для самостоятельного решения**

**Задача № 1.18.** Определить продолжительность затвердевания слитка спокойной стали, отлитого в изложницу. Марка стали и размеры изложниц приведены в таблице 1 (условные обозначения на рис. 3).

Таблица 1 – Варианты заданий для задачи № 1.18

№ вар.	Марка стали	Размеры изложницы, мм									
		Основная часть					Прибыльная часть				
		h	b <sub>в</sub>	b <sub>н</sub>	a <sub>в</sub>	a <sub>н</sub>	h	b <sub>в</sub>	b <sub>н</sub>	a <sub>в</sub>	a <sub>н</sub>
1	08	1930	1470	1450	630	590	430	1240	1440	470	600
2	20	1400	1070	1050	470	440	330	900	1050	350	440
3	40	1800	1250	1220	520	490	400	1050	1210	390	500
4	60	1580	640	680	500	550	340	590	620	460	480
5	50Г	1730	700	740	550	600	370	640	680	500	520
6	50Х	1760	1340	1320	580	540	400	1130	1310	430	550
7	35Г2	1470	600	630	470	510	310	540	570	420	440
8	12ГС	1900	770	810	600	660	400	700	740	540	570
9	17Г1С	1810	780	740	630	580	390	710	670	550	520
10	17ГС	1590	680	650	550	500	340	620	590	480	450
11	09Г2С	1600	1220	1200	530	500	370	1030	1200	400	500
12	10ГС	1640	1140	1110	480	450	370	960	1100	360	460
13	35ГС	1730	700	740	550	600	370	640	680	500	520
14	25Г2С	1900	810	770	660	600	400	740	700	570	540
15	12ГС	1520	620	650	480	530	320	560	600	440	460

**Задача № 1.19.** Определить продолжительность и среднюю скорость затвердевания слитка кипящей стали, отлитой в изложницу. Марка стали и размеры изложниц приведены в таблице 2 (условные обозначения на рис. 5).

**Задача № 1.20.** Определить скорость наполнения изложницы металлом в начале, середине и в конце разливки плавки из сталеразливочного ковша стали марки Ст.3сп. Исходные данные приведены в таблице 3.

**Задача № 1.21.** Определить диаметры каналов стаканов сталеразливочного и промежуточного ковшей при разливке сверху стали марки 20ХГНМ в слитки через промежуточный ковш. Вместимость сталеразливочного ковша, параметры слитков и количество одновременно наполняемых изложниц приведены в таблице 3 (четвертый столбец не используется). Наилучшее качество поверхности получается при наполнения изложниц со скоростью 0,55 м/мин.

Таблица 2 – Варианты заданий для задачи № 1.19

№ вар.	Марка стали	Размеры изложницы, мм				
		h	b <sub>в</sub>	b <sub>н</sub>	a <sub>в</sub>	a <sub>н</sub>
1	08кп	2100	740	780	740	780
2	10кп	1960	800	850	520	580
3	15кп	1730	700	740	550	600
4	20кп	1910	680	710	680	710
5	25кп	1590	650	680	500	550
6	08кп	1680	600	630	600	630
7	10кп	2210	780	820	780	820
8	15кп	2150	870	930	570	630
9	20кп	2370	960	1030	630	700
10	25кп	2090	850	900	660	730
11	08кп	1830	650	680	650	680
12	10кп	1870	760	810	500	550
13	15кп	1830	650	680	650	680
14	20кп	1900	770	810	600	660
15	25кп	1660	670	710	530	580

Таблица 3 – Варианты заданий для задач №№ 1.20 и 1.21

№ вар.	Масса плавки, т	Масса слитка, т	Диаметр канала стакана стальной ковша, мм	Высота слитка, мм	Количество одновременно наполняемых изложниц	Способ разливки
1	200	7,8	60	2300	1	Сверху
2	200	10,0	60	2200	1	Сверху
3	200	9,6	60	1900	1	Сверху
4	200	5,4	50	1800	2	Сифоном
5	200	2,6	50	1600	4	Сифоном
6	120	7,8	50	2300	1	Сверху

7	120	10,0	50	2200	1	Сверху
8	120	9,6	50	1900	1	Сверху
9	120	5,4	40	1800	2	Сифоном
10	120	2,6	40	1600	4	Сифоном
11	350	7,8	60	2300	1	Сверху
12	350	10,0	60	2200	1	Сверху
13	350	9,6	60	1900	1	Сверху
14	350	5,4	70	1800	2	Сифоном
15	350	2,6	70	1600	4	Сифоном

**Задача № 1.22.** Определить диаметр канала стакана сталеразливочного ковша для разливки стали в изложницы сверху. Вид стали, вместимость сталеразливочного ковша и параметры слитков приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Варианты заданий для задачи № 1.22

№ вар.	Масса плавки, т	Масса слитка, т	Вид стали	Высота слитка, мм
1	200	7,8	Полуспокойная	2300
2	200	10,0	Кипящая	2200
3	200	9,6	Полуспокойная	1900
4	200	5,4	Кипящая	1800
5	200	2,6	Полуспокойная	1600
6	120	7,8	Кипящая	2300
7	120	10,0	Полуспокойная	2200
8	120	9,6	Кипящая	1900
9	120	5,4	Полуспокойная	1800
10	120	2,6	Кипящая	1600
11	350	7,8	Полуспокойная	2300
12	350	10,0	Кипящая	2200
13	350	9,6	Полуспокойная	1900
14	350	5,4	Кипящая	1800
15	350	2,6	Полуспокойная	1600

**Задача № 1.23.** Сталь марки 20кп разливается из 260-т сталеразливочного ковша через два стакана диаметром 80 мм на слитки массой 14 т (средние размеры сечения слитка 700x1000, высота 2200 мм). Определить скорость наполнения изложниц в начале, середине и конце разливки плавки? Исходя из полученных данных оценить величину «здоровой» корочки и ответить на вопрос: «Для слитков какого периода разливки возможно образование рванин при их прокатке?»

**Задача № 1.24.** Сталь марки 30 разливается из 110-т сталеразливочного ковша сверху через стакан диаметром 35 мм на слитки массой 5 т. Какова скорость разливки стали в начале, середине и конце разливки? Разливка ведется при полностью открытом шиберном затворе.



**Задача № 1.25.** Для разливки стали марки 20ХН4ФА на 7-т слитки выбрать диаметр канала стакана 200-т сталеразливочного ковша. Разливка производится сифонным способом в изложницы, установленные на 4-местных поддонах. Наилучшее качество поверхности слитков получается при скорости наполнения изложниц от 0,3 до 0,5 м/мин. Какова продолжительность затвердевания такого слитка?

**Задача № 1.26.** Для 17-тонного слитка стали марки Ст.3пс определить диаметр канала стакана для отливки таких слитков сверху из 300-т сталеразливочного ковша. Какую макроструктуру имеют обычно такие слитки?

## 2 Непрерывная разливка стали

### 2.1 Характеристика непрерывной разливки стали

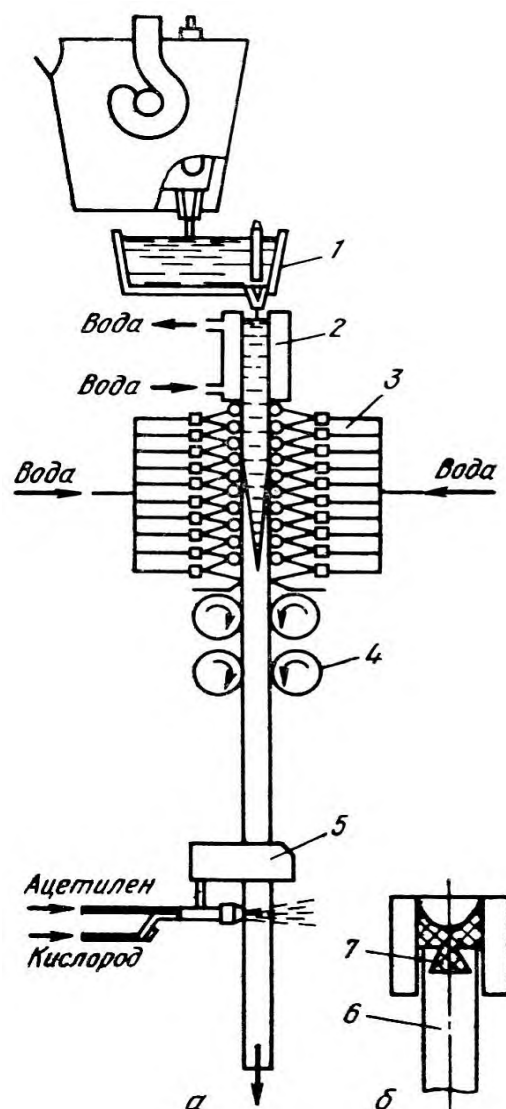
Способ непрерывной разливки заключается в том, что жидкую сталь заливают в интенсивно охлаждаемую сквозную форму – кристаллизатор, где формируется корочка непрерывнолитой заготовки (НЛЗ) – оболочка будущей заготовки. Заготовку с не полностью затвердевшей сердцевиной непрерывно вытягивают из кристаллизатора и дополнительно охлаждают в так называемой зоне вторичного охлаждения (ЗВО) водой, распыляемой форсунками. В результате в процессе непрерывной заливки металла и его затвердевания формируется непрерывнолитая заготовка.

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

При использовании МНЛЗ (рис. 10) сталь из сталеразливочного ковша поступает в промежуточный ковш, а из него в кристаллизатор. В кристаллизаторе образуется твердая оболочка заготовки, заполненная жидкой сталью по сечению, отвечающему готовой заготовке. Частично затвердевшая заготовка с помощью транспортирующей системы – тянущей клетки поступает в зону вторичного охлаждения, где происходит её полное затвердевание. Затвердевшая заготовка режется на мерные длины и с помощью рольганга или других транспортных средств направляются на склад и в прокатный цех.

Разливку ведут до израсходования металла в сталеразливочном ковше или же разливают без перерыва металл из нескольких ковшей (разливка методом «плавка на плавку»).

Качество НЛЗ во многом зависит от правильности выбора технологических параметров процесса разливки, который должен быть сделан с учетом типа



1 - промежуточный ковш;  
2 - кристаллизатор;  
3 - зона вторичного охлаждения;  
4 - тянущая клетка; 5 - резка; 6 - затравка;  
7 - закристаллизовавшийся металл  
Рисунок 10 – Схемы разливки стали на МНЛЗ (а) и действие затравки (б)

МНЛЗ, размеров поперечного сечения заготовки, марки стали. Ниже рассмотрена методика решения типовых задач непрерывной разливки стали.

## 2.2 Расчеты динамики и продолжительности затвердевания непрерывнолитой заготовки

Главными факторами, определяющими продолжительность затвердевания НЛЗ, являются размеры ее поперечного сечения: толщина **a** и ширина **b**. С достаточной точностью продолжительность затвердевания заготовки можно определить по формуле

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

где **a** – толщина заготовки, мм;

$\tau_3$  – продолжительность затвердевания, мин;

$K_\phi$  – коэффициент формы поперечного сечения заготовки, ед.;

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

Численное значение коэффициента формы  $K_\phi$  принимается следующим образом:

$K_\phi = 1$ , если  $b/a \geq 2$ ;

$K_\phi = 0,5 + 0,25 \cdot b/a$ , если  $b/a < 2$ .

Величину коэффициента затвердевания **k** рекомендуется принимать в пределах 24-27 мм/мин<sup>1/2</sup> для всех марок спокойной стали (с увеличением величины перегрева металла в промежуточном ковше коэффициент затвердевания уменьшается: от 26-27 мм/мин<sup>1/2</sup> при перегреве  $\Delta t_{пр.к} = 10-20$  °С, до 24-25 мм/мин<sup>1/2</sup> при перегреве  $\Delta t_{пр.к}$  более 20 °С). Коэффициент затвердевания кипящих сталей рекомендуется принимать в пределах 22-24 мм/мин<sup>1/2</sup>.

**Задача № 2.1.** Определить толщину слоя затвердевшего металла стали марки 40Х на выходе из кристаллизатора длиной 1200 мм вертикальной МНЛЗ и в середине каждой секции ЗВО длиной 0,2; 1; 2; 4,2; 5; 6 м, если заготовка с размерами поперечного сечения 200×1100 мм вытягивается со скоростью 1,1 м/мин.

Решение. Исходные данные:

- заготовка сечением 200×1100 мм;
- высота кристаллизатора  $h_{кр} = 1200$  мм;
- скорость вытягивания  $W = 1,1$  м/мин;
- длины секций ЗВО: 0,2; 1; 2; 4,2; 5; 6 м;

Толщину затвердевшей корочки НЛЗ в процессе её формирования можно определить по формуле (при определении толщины корочки коэффициент формы можно не учитывать):

$$\xi = k\sqrt{\tau},$$

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

$\tau$  – продолжительность затвердевания, мин;

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

Принимаем величину коэффициента затвердевания  $k = 25$  мм/мин<sup>1/2</sup>.

Продолжительность формирования корочки будет равна длительности пребывания НЛЗ в кристаллизаторе и секциях ЗВО, которую можно определить из выражения:

$$\tau = \frac{h}{W},$$

где  $h$  – протяженность участка от уровня металла в кристаллизаторе до текущей секции ЗВО, м;

$W$  – скорость вытягивания НЛЗ, м/мин.

Тогда время нахождения металла в кристаллизаторе и толщина слоя затвердевшего металла стали марки 40X на выходе из кристаллизатора составит

$$\tau_k = \frac{1,1}{1,1} = 1 \text{ мин}; \quad \xi_k = 25 \cdot \sqrt{1} = 25 \text{ мм.}$$

Аналогично определяем длительность затвердевания и толщину корочки НЛЗ в момент прохождения середины первой секции ЗВО, протяженностью 0,2 м

$$\tau_1 = \frac{1,1 + 0,2/2}{1,1} = 1,09 \text{ мин}; \quad \xi_1 = 25 \cdot \sqrt{1,09} = 26,1 \text{ мм.}$$

Аналогично определяем продолжительность затвердевания НЛЗ и толщину слоя затвердевшего металла стали марки 40X в середине последующих секций ЗВО. Результаты сводим в таблицу.

№ секции	Продолжительность затвердевания, мин	Толщина затвердевшего металла, мм
Крист.	1	25
1	1,09	26,1
2	1,64	32
3	3	43,3
4	5,82	60,3
5	10	79,1
6	15	96,8

**Задача №2.2.** Определить продолжительность затвердевания НЛЗ с размерами поперечного сечения 230×1250 мм из стали марки 09Г2С.

Решение:

Продолжительность затвердевания НЛЗ ( $\tau_3$ , мин) можно определить по формуле

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

где  $\xi$  – толщина корочки, при которой завершится затвердевание НЛЗ, мм;

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

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

НЛЗ полностью затвердеет, когда толщина затвердевшего слоя металла  $\xi$  станет равной половине толщины заготовки, то есть  $\xi = a/2$ .

Тогда уравнение для расчета продолжительности затвердевания НЛЗ будет иметь вид

$$\tau = K_{\phi} \cdot \left( \frac{a}{2 \cdot k} \right)^2.$$

Принимаем, что для разливаемой стали марки 09Г2С коэффициент затвердевания  $k = 25$  мм/мин<sup>1/2</sup>. Для НЛЗ сечением 230×1250 мм отношение  $b/a = 5,4$ , то есть больше 2, поэтому коэффициент формы  $K_{\phi} = 1$ .

Тогда продолжительность затвердевания составит

$$\tau = 1 \cdot \left( \frac{230}{2 \cdot 25} \right)^2 = 26,16 \text{ мин.}$$

**Задача № 2.3.** Определить продолжительность затвердевания НЛЗ с размерами поперечного сечения 300×300 мм из стали марки 35ХМ.

Решение:

Уравнение для определения продолжительности затвердевания НЛЗ имеет вид (см. задачу 2.2)

$$\tau = K_{\phi} \cdot \left( \frac{a}{2 \cdot k} \right)^2.$$

Принимаем, что для разливаемой стали марки 35ХМ коэффициент затвердевания  $k = 25$  мм/мин<sup>1/2</sup>. Для НЛЗ сечением 300×300 мм отношение  $b/a = 1$ , поэтому коэффициент формы  $K_{\phi} = 0,75$ .

Тогда продолжительность затвердевания составит

$$\tau = 0,75 \cdot \left( \frac{300}{2 \cdot 25} \right)^2 = 27 \text{ мин.}$$

**Задача № 2.4.** Определить продолжительность затвердевания НЛЗ с размерами поперечного сечения 160×220 мм из стали марки 17Г1С.

Решение:

Уравнение для определения продолжительности затвердевания НЛЗ имеет вид (см. задачу 2.2)

$$\tau = K_{\phi} \cdot \left( \frac{a}{2 \cdot k} \right)^2.$$

Принимаем, что для разливаемой стали марки 17Г1С коэффициент затвердевания  $k = 25 \text{ мм/мин}^{1/2}$ . Для НЛЗ сечением 160×220 мм отношение  $b/a = 1,375$ , поэтому коэффициент формы равен

$$K_{\phi} = 0,5 + 0,25 \cdot b/a = 0,5 + 0,25 \cdot 1,375 = 0,84.$$

Тогда продолжительность затвердевания составит

$$\tau = 0,84 \cdot \left( \frac{160}{2 \cdot 25} \right)^2 = 8,6 \text{ мин.}$$

**Задача № 2.5.** Двухручьевая МНЛЗ криволинейного типа имеет длину кристаллизатора 1000 мм и шестисекционную ЗВО. Длина секций ЗВО равна 0,2; 0,8; 2,4; 4,0; 6,2 и 7 м. В слябах из стали марки Ст.2сп сечением 240×1500 мм, отлитых со скоростью 0,8 м/мин, обнаружены гнездообразные трещины на расстоянии 40...55 мм от поверхности. В какой секции(ях) на поверхность сляба подается недостаточно охладителя (причина трещин – локальный разогрев поверхности НЛЗ)?

Решение: Исходные данные:

- заготовка сечением 240×1500 мм;
- высота кристаллизатора  $h_{кр} = 1000 \text{ мм}$ ;
- скорость вытягивания  $W = 0,8 \text{ м/мин}$ ;
- длины секций ЗВО: 0,2; 0,8; 2,4; 4,0; 6,2; 7 м.

Толщину затвердевшей корочки НЛЗ в процессе её формирования можно определить по формуле (при определении толщины корочки коэффициент формы можно не учитывать):

$$\xi = k\sqrt{\tau},$$

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

$\tau$  – продолжительность затвердевания, мин;

$k$  – коэффициент затвердевания,  $\text{мм/мин}^{1/2}$ .

Из этого выражения можно получить уравнение для определения продолжительности формирования затвердевшей корочки толщиной  $\xi = 40 \dots 55$  мм

$$\tau = \left( \frac{\xi}{k} \right)^2.$$

Считаем, что для разливаемой стали марки Ст.2сп коэффициент затвердевания  $k = 25$  мм/мин<sup>1/2</sup>.

При  $\xi_1 = 40$  мм и  $\xi_2 = 55$  мм продолжительность затвердевания составит

$$\tau_1 = \left( \frac{40}{25} \right)^2 = 2,56 \text{ мин}; \quad \tau_2 = \left( \frac{55}{25} \right)^2 = 4,84 \text{ мин}.$$

Расстояние, которое проходит заготовка за это время ( $L$ , м) при скорости вытягивания  $W = 0,8$  м/мин можно определить из выражения

$$L = \tau \cdot W.$$

Тогда, при  $\xi_1 = 40$  мм  $L_1 = \tau \cdot W = 2,56 \cdot 0,8 = 2,05$  м, а при  $\xi_2 = 55$  мм

$L_2 = \tau \cdot W = 4,84 \cdot 0,8 = 3,9$  м.

Принимаем уровень металла в кристаллизаторе (недолив) – 100 мм, тогда высота активной зоны кристаллизатора  $h_{\text{акт. кр.}} = 900$  мм.

Тогда время начала и конца образования трещин соответствует пребыванию НЛЗ в третьей секции ЗВО, поскольку протяженность активной зоны кристаллизатора и первых двух секций ЗВО составляет  $0,9+0,2+0,8 = 1,9$  м, а вместе с третьей – 4,3 м.

Гнездообразные трещины (см. рис. 11) представляют собой разрывы металла в виде пересекающихся друг с другом лентообразных трещин. Причиной их образования являются усадочные напряжения внутренних слоев твердой оболочки, вызванные повышенными температурными градиентами по длине заготовки вследствие неправильной настройки вторичного охлаждения.



Рисунок 11 – Макрофотография дефекта «Гнездообразная трещина»

Для получения качественной заготовки можно рекомендовать увеличение интенсивности подачи охладителя в третьей секции ЗВО.

**Задача № 2.6.** Определить среднюю скорость затвердевания и глубину лунки жидкого металла в непрерывно-литой заготовке из стали марки 17Г1С, имеющей размеры поперечного сечения 200×950 мм и отливаемой на криволинейной МНЛЗ со скоростью вытягивания 0,9 м/мин.

Решение:

Среднюю скорость затвердевания можно определить из выражения

$$v = \frac{\Delta\xi}{\Delta\tau}$$

Толщина затвердевшего слоя заготовки, определяющая длительность затвердевания равна  $\Delta\xi = a/2 = 200/2 = 100$  мм.

Интервал затвердевания ( $\Delta\tau$ ) соответствует продолжительности затвердевания ( $\tau$ ), которая определяется по формуле

$$\tau = K_{\phi} \cdot \left( \frac{a}{2 \cdot k} \right)^2.$$

Принимаем, что для разливаемой стали марки 17Г1С коэффициент затвердевания  $k = 25$  мм/мин<sup>1/2</sup>. Для НЛЗ сечением 200×950 мм отношение  $b/a > 2$ , поэтому коэффициент формы равен 1.

Тогда

$$\tau = 1 \cdot \left( \frac{200}{2 \cdot 25} \right)^2 = 16 \text{ мин.}$$

Средняя скорость затвердевания составит

$$v = \frac{100}{16} = 6,25 \text{ мм/мин.}$$

Глубина лунки жидкого металла при скорости вытягивания  $W=0,9$  м/мин составит

$$L_{\text{ж}} = W \cdot \tau = 0,9 \cdot 16 = 14,4 \text{ м.}$$

### 2.3 Расчеты технологических параметров непрерывной разливки

К технологическим параметрам МНЛЗ относятся:

- допустимая скорость вытягивания НЛЗ;
- время разливки плавки;
- требуемая металлургическая длина МНЛЗ;
- производительность МНЛЗ и др.



Исходными для расчета данными являются: параметры НЛЗ и разливаемого металла, металлургическая длина машины, высота кристаллизатора, количество и длина участков вторичного охлаждения и др.

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. Ограничениями при выборе скорости вытягивания являются:

- требования к толщине затвердевшей корочки на выходе из кристаллизатора;
- полное затвердевание заготовки в пределах металлургической длины МНЛЗ.

Максимально допустимая скорость вытягивания заготовки ( $W$ , м/мин), обеспечивающая формирование требуемой толщины затвердевшей корочки ( $\xi_{кр}$ , мм) на выходе из кристаллизатора с активной длиной ( $h_a$ , м), определяется из выражения

$$W = \left( \frac{k}{\xi_{кр}} \right)^2 \cdot h_a.$$

Исходя из условия обеспечения полного затвердевания заготовки в пределах металлургической длины МНЛЗ ( $L_{мет}$ , м), максимально допустимая скорость вытягивания заготовки ( $W$ , м/мин) может быть найдена из выражения

$$W = \left( \frac{2 \cdot k}{a} \right)^2 \cdot L_{мет},$$

где  $a$  – толщина заготовки, мм.

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

$$L_{мет} \geq L_{ж},$$

где  $L_{ж}$  – глубина жидкой лунки (м), определяемая продолжительностью затвердевания НЛЗ ( $\tau$ , мин) и скоростью её вытягивания ( $W$ , м/мин) из выражения

$$L_{ж} = \tau \cdot W.$$

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 ра-

боты отделения выплавки и разливки стали длительность разливки плавки (машинное время разливки) можно определить по уравнению

$$\tau_m = \frac{M}{N \cdot \rho_{ст} \cdot F \cdot W_p},$$

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 МНЛЗ;

$\rho_{ст}$  – плотность затвердевшей стали в конце зоны вторичного охлаждения, т/м<sup>3</sup> (в упрощенных расчетах 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.

Поскольку основным видом непрерывной разливки в современных сталеплавильных цехах является метод «плавка на плавку», то фактическое время разливки плавки необходимо синхронизировать с продолжительностью выплавки и ковшевой обработки стали, что обеспечивает ритмичность работы плавильного и разливочного отделений.

Годовая производительность МНЛЗ определяется по формуле

$$П = M \cdot \frac{1440}{1,15 \cdot Z \cdot \left( \tau_m + \frac{\tau_{пс}}{S} \right) + 1,15 \cdot (100 - Z) \cdot (\tau_m + \tau_{п})} \cdot g_r \cdot D,$$

где  $П$  – годовая производительность МНЛЗ, т/год;

1440 – количество минут в сутках;

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

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

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

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

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

$g_r$  – выход годных заготовок, %;

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

Доля плавков, разливаемых сериями методом «плавка на плавку» ( $Z$ ), в современных сталеплавильных цехах достигает 90 % и более. Нормативные значе-

ния выхода годного при непрерывной разливке ( $g_r$ ) составляют: для слябовой заготовки – 95 %; для сортовой – 94 %. Фактическое время разливки ( $D$ ) согласно действующим нормативам составляет:

- слябовые машины – 291 сут;
- сортовые машины – 300 сут.

Длительность паузы при работе МНЛЗ методом «плавка на плавку» ( $\tau_{пс}$ ) для слябовых машин составляет 150...180 мин, а для сортовых 80...110 мин. Время подготовки машин к разливке ( $\tau_{пс}$ ) определяется её конструктивными особенностями и обычно составляет:

- слябовые машины (одно- и двухручьевые) – 160 мин;
- сортовые машины: - четырехручьевые – 95 мин;  
- шестиручьевые (и более) – 105 мин.

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

Разливка методом «плавка на плавку» позволяет увеличить производительность МНЛЗ минимум в 2-3 раза. Серийность разливки (количество плавков в серии) определяется стойкостью разливочного оборудования, а также уровнем организации производства и может достигать 1000 плавков и более. Однако, рекомендуется ограничивать количество плавков в серии:

- слябовые машины – 50-100 плавков;
- сортовые машины – 20-60 плавки.

**Задача № 2.7.** Двухручьевая МНЛЗ вертикального типа имеет кристаллизатор высотой 1000 мм и зону вторичного охлаждения длиной 15,8 м. С какой скоростью можно вести разливку стали марки 09Г2С на заготовку сечением 200x800 мм, если для безаварийной работы на выходе из кристаллизатора нужно иметь слой затвердевшего металла толщиной не менее 25 мм? Какие мероприятия нужно осуществить для того, чтобы можно было повысить скорость разливки?

**Решение.**

Максимально допустимая скорость вытягивания заготовки ( $W$ , м/мин), обеспечивающая формирование требуемой толщины корочки ( $\xi_{кр} = 25$  мм) на выходе из кристаллизатора с активной длиной ( $h_a$ , м), определяется из выражения

$$W = \left( \frac{k}{\xi_{кр}} \right)^2 \cdot h_a.$$

Принимаем, что для разливаемой стали марки 09Г2С коэффициент затвердевания  $k = 25 \text{ мм/мин}^{1/2}$ . При уровне недолива 100 мм, активная длина кристаллизатора составит  $h_a = 900 \text{ мм}$  (0,9 м). Тогда максимально допустимая скорость вытягивания заготовки ( $W$ , м/мин) по условию толщины корочки на выходе из кристаллизатора составит

$$W = \left( \frac{k}{\xi_{\text{кр}}} \right)^2 \cdot h_a = \left( \frac{25}{25} \right)^2 \cdot 0,9 = 0,9 \text{ м/мин.}$$

Однако, обязательным условием безаварийной работы МНЛЗ является обеспечения полного затвердевания заготовки в пределах металлургической длины МНЛЗ ( $L_{\text{мет}}$ , м). Исходя из этого условия, допустимая скорость вытягивания заготовки определяется по уравнению

$$W = \left( \frac{2 \cdot k}{a} \right)^2 \cdot L_{\text{мет}},$$

где  $a$  – толщина заготовки, мм.

Для заготовки толщиной  $a = 200 \text{ мм}$  и МНЛЗ с металлургической длиной, равной сумме активной длины кристаллизатора (0,9 м) и длине ЗВО (15,8 м), то есть  $L_{\text{мет}} = 0,9 + 15,8 = 16,7 \text{ м}$ , допустимая скорость вытягивания заготовки составит

$$W = \left( \frac{2 \cdot k}{a} \right)^2 \cdot L_{\text{мет}} = \left( \frac{2 \cdot 25}{200} \right)^2 \cdot 16,7 = 1,04 \text{ м/мин.}$$

Таким образом, одновременное выполнение условий получения требуемой толщины корочки на выходе из кристаллизатора и безаварийной работы МНЛЗ, удовлетворяет скорость вытягивания  $W = 0,9 \text{ м/мин}$ , которую и следует считать максимально допустимой для рассматриваемых в задаче условиях.

**Задача № 2.8.** Определить необходимую длину зоны вторичного охлаждения четырехручьевого МНЛЗ вертикального типа при отливке НЛЗ сечением 200x250 мм из стали марки 40Х со скоростью вытягивания 0,5...0,9 м/мин. Высота кристаллизатора 1000 мм. Другие данные, необходимые для расчета, принять самостоятельно.

Решение.

Требуемая длина зоны вторичного охлаждения определяется из условия обеспечения полного затвердевания заготовки в пределах металлургической длины МНЛЗ ( $L_{\text{мет}}$ , м):

$$L_{\text{мет}} \geq L_{\text{ж}},$$

где  $L_{ж}$  – глубина жидкой лунки (м), определяемая продолжительностью затвердевания НЛЗ ( $\tau$ , мин) и скоростью её вытягивания ( $W$ , м/мин) из выражения

$$L_{ж} = \tau \cdot W.$$

Металлургическая длина МНЛЗ складывается из активной длины кристаллизатора (за минусом недолива) и длины ЗВО, то есть

$$L_{мет} = h_a + h_{ЗВО}.$$

В случае выполнения равенства  $L_{мет} = L_{ж}$ , минимально требуемая протяженность ЗВО может быть найдена из выражения

$$h_{ЗВО} = \tau \cdot W - h_a.$$

Уравнение для определения продолжительности затвердевания НЛЗ имеет вид (см. задачу 2.2)

$$\tau = K_{\phi} \cdot \left( \frac{a}{2 \cdot k} \right)^2.$$

Принимаем, что для разливаемой стали марки 40Х коэффициент затвердевания  $k = 25$  мм/мин<sup>1/2</sup>. Для НЛЗ сечением 200x250 мм отношение  $b/a = 1,25$ , поэтому коэффициент формы равен

$$K_{\phi} = 0,5 + 0,25 \cdot b/a = 0,5 + 0,25 \cdot 1,25 = 0,8125.$$

Тогда продолжительность затвердевания составит

$$\tau = 0,8125 \cdot \left( \frac{200}{2 \cdot 25} \right)^2 = 13 \text{ мин.}$$

При уровне недолива металла в кристаллизаторе 0,1 м, его активная длина составит  $h_a = 1000 - 100 = 900$  мм.

Расчет требуемой протяженности ЗВО следует вести на максимальную скорость разливки, то есть  $W = 0,9$  м/мин. Тогда необходимую длину зоны вторичного охлаждения составит

$$h_{ЗВО} = \tau \cdot W - h_a = 13 \cdot 0,9 - 0,9 = 10,8 \text{ м.}$$

**Задача № 2.9.** Сталь марки Ст.3сп разливается из 300-т сталеразливочного ковша на 2-х ручьевой МНЛЗ криволинейного типа с рабочей скоростью вытягивания 0,8 м/мин. Поперечное сечение слябов 220x1500 мм, а длина – 7м. Вычислить продолжительность разливки плавки и количество отлитых мерных заготовок.

Решение.

Зависимость между скоростью вытягивания заготовки и соответствующей ей скоростью разливки (для одного ручья) описывается уравнением

$$q = \rho_{ст} \cdot a \cdot b \cdot W,$$

где  $q$  – скорость разливки, т/мин;

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

$W$  – скорость вытягивания заготовки, м/мин.

При скорости вытягивания  $W = 0,8$  м/мин и плотности металла  $7,6$  т/м<sup>3</sup> скорость разливки стали через 1 ручей ( $q$ , т/мин) составит

$$q = \rho_{ст} \cdot a \cdot b \cdot W = 7,6 \cdot 0,22 \cdot 1,5 \cdot 0,8 = 2,01 \text{ т/мин.}$$

Суммарная скорость разливки 2-х ручьевой МНЛЗ составит  $q_{\Sigma} = 2,01 \cdot 2 = 4,02$  т/мин.

Тогда продолжительность разливки плавки составит

$$\tau_{разл} = \frac{M}{q_{\Sigma}} = \frac{300}{4,02} = 76,4 \text{ мин,}$$

где  $M$  – масса разливаемой стали, т.

Масса одного сляба при его длине  $7$  м  $m_{сляб} = 0,22 \cdot 1,5 \cdot 7,6 \cdot 7 = 17,6$ т.

Тогда количество отлитых мерных заготовок составит

$$n_{сляб} = \frac{300}{17,6} = 17,04 \approx 17 \text{ шт.}$$

**Задача № 2.10.** Сталь марки 09Г2 разливалась из 210-т сталеразливочного ковша на 2-х ручьевой МНЛЗ криволинейного типа. Поперечное сечение слябов  $180 \times 1300$  мм, а мерная длина – 6м. Рабочая скорость вытягивания –  $0,7$  м/мин. Через 42 мин машина была аварийно остановлена. Сколько мерных слябов было отлито и какова их общая масса?

Решение.

Зависимость между скоростью вытягивания заготовки и соответствующей ей скоростью разливки (для одного ручья) описывается уравнением

$$q = \rho_{ст} \cdot a \cdot b \cdot v,$$

где  $q$  – скорость разливки, т/мин;

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

$v$  – скорость вытягивания заготовки, м/мин.

При скорости вытягивания  $W = 0,7$  м/мин и плотности металла  $7,6$  т/м<sup>3</sup> скорость разливки стали через 1 ручей ( $q$ , т/мин) составит

$$q = \rho_{ст} \cdot a \cdot b \cdot W = 7,6 \cdot 0,18 \cdot 1,3 \cdot 0,7 = 1,245 \text{ т/мин.}$$

Суммарная скорость разливки 2-х ручьевой МНЛЗ составит  $q_{\Sigma} = 1,245 \cdot 2 = 2,49 \text{ т.}$

За 42 минуты разливки будет разлито металла  $M_{мет} = 42 \cdot 2,49 = 104,6 \text{ тонн.}$

Масса одного сляба при его длине 6 м  $m_{сляб} = 0,18 \cdot 1,3 \cdot 7,6 \cdot 6 = 10,67 \text{ т.}$

Тогда количество отлитых мерных заготовок составит

$$n_{сляб} = \frac{104,6}{10,67} \approx 9,8 \text{ шт, то есть } 9 \text{ шт.}$$

Однако, поскольку, по условиям задачи, разливка велась одновременно на 2-х ручьях, то на каждом ручье к моменту аварии разлили по  $9,8/2 = 4,9$  заготовок, из которых только 4 заготовки будут иметь длину 5. Таким образом, суммарное количество годных заготовок составит 8 шт.

**Задача № 2.11.** Вычислить требуемое количество ручьев МНЛЗ для разливки стали марки 09Г2С на заготовку сечением 250x350 мм из 160-т сталеразливочного ковша при рабочем диапазоне скоростей вытягивания заготовки 1,05...1,15 м/мин. Продолжительность разливки плавки не должна превышать 60 минут.

Решение.

Требуемое количество ручьев МНЛЗ (N) можно определить из условия обеспечения заданной продолжительности разливки по уравнению

$$N = \frac{M}{\tau_{м} \cdot \rho_{ст} \cdot F \cdot W_{р}},$$

где M – масса стали в сталеразливочном ковше, т;

$\tau_{м}$  – машинное время разливки, мин;

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

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

$W_{р}$  – рабочая скорость вытягивания заготовки, м/мин.

Принимаем, что машинное время разливки  $\tau_{м} = 60$  мин, а плотность металла затвердевшей заготовки 7,6 т/м<sup>3</sup>.

Расчет требуемого количества ручьев необходимо вести при минимальной скорости вытягивания, равной  $W = 1,05$  м/мин.

Тогда максимальное требуемое количество ручьев МНЛЗ составит

$$N = \frac{M}{\tau_M \cdot \rho_{ст} \cdot F \cdot W_p} = \frac{160}{60 \cdot 7,6 \cdot 0,25 \cdot 0,35 \cdot 1,05} = 3,82 \text{ шт.}$$

Для гарантированного выполнения заданных параметров разливки принимаем количество ручьев равное 4 шт.

**Задача № 2.12.** Определить машинное время разливки плавки стали марки 17Г1С из 200 т сталеразливочного ковша на 2-х ручьевой МНЛЗ рабочей скорости вытягивания 1,2 м/мин и сечении отливаемой заготовки 250×900 мм.

Решение.

Машинное время разливки ( $\tau_M$ , мин) можно определить по уравнению

$$\tau_M = \frac{M}{N \cdot \rho_{ст} \cdot F \cdot W_p},$$

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

$N$  – количество ручьев МНЛЗ;

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

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

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

Тогда, при известных данных и плотности затвердевшей стали равной 7,6 т/м<sup>3</sup>, машинное время разливки составит

$$\tau_M = \frac{M}{N \cdot \rho_{ст} \cdot F \cdot v_p} = \frac{200}{2 \cdot 7,6 \cdot 0,25 \cdot 0,9 \cdot 1,2} = 48,7 \text{ мин.}$$

**Задача № 2.13.** Определить годовую производительность МНЛЗ из условий задачи 2.12, если 90% плавков разливается сериями ( $Z = 90\%$ ) по 20 шт. ( $S = 20$  шт.).

Решение.

Расчет годовой производительности МНЛЗ проводится по формуле

$$\Pi = M \cdot \frac{1440}{1,15 \cdot Z \cdot \left( \tau_M + \frac{\tau_{пс}}{S} \right) + 1,15 \cdot (100 - Z) \cdot (\tau_M + \tau_{п})} \cdot g_r \cdot D,$$

где входящие переменные принимаются исходя из рекомендаций теоретической части:

– выход годных для слябовых заготовок  $g_r = 95\%$ ;



- длительность паузы между сериями для слябовых машин  $\tau_{\text{пс}} = 160$  мин;
- длительность паузы между разливкой двух одиночных плавков  $\tau_{\text{п}} = 55$  мин;
- фактическое годовое время разливки  $D = 291$  сут.

Тогда, годовая производительность двухручьевого слябовой МНЛЗ составит

$$\Pi = \frac{200 \cdot 1440 \cdot 95 \cdot 291}{1,15 \cdot 90 \cdot \left(48,7 + \frac{160}{20}\right) + 1,15 \cdot (100 - 90) \cdot (48,7 + 55)} = 1127568 \text{ т/год.}$$

#### 2.4 Расчеты диаметров разливочных стаканов для непрерывной разливки стали

Диаметры каналов стаканов в сталеразливочном и промежуточном ковшах вычисляются из выражения

$$q = k_p \cdot d^2 \cdot \sqrt{h},$$

где  $q$  – максимальная скорость разливки из разливочного стакана, т/мин

$k_p$  – коэффициент скорости разливки, т/(мин·мм<sup>2</sup>·м<sup>0,5</sup>);

$d$  – диаметр канала стакана, мм;

$h$  – высота слоя жидкого металла в ковше, м.

Расчет диаметров каналов стаканов и в сталеразливочном, и в промежуточном ковшах ведется на максимальную скорость разливки ( $q_{\text{макс}}$ ), причем при расчете диаметра канала стакана сталеразливочного ковша необходимо учитывать подачу жидкого металла одновременно в несколько кристаллизаторов, а при расчете диаметра разливочного стакана промковша расчет ведется только на 1 ручей (рис. 12). При расчете диаметра канала для сталеразливочного ковша рекомендуется принимать  $k_p = 1,2 \cdot 10^{-3}$  т/(мин·мм<sup>2</sup>·м<sup>1/2</sup>) и  $h = 0,5-0,7$  м, а для промежуточного ковша  $k_p = 1,1 \cdot 10^{-3}$  т/(мин·мм<sup>2</sup>·м<sup>1/2</sup>) и  $h = 0,8-1,0$  м.

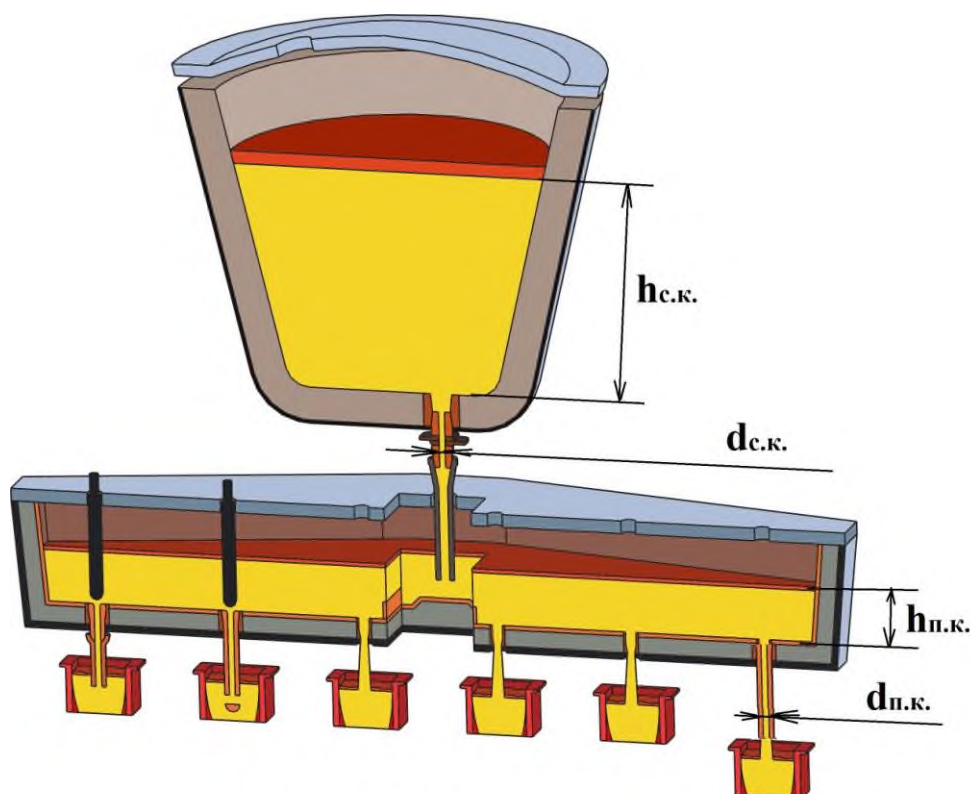


Рисунок 12 – Схема разлива стали по ручьям МНЛЗ

Диаметры каналов стаканов сталеразливочного и промежуточного ковшей принимается путем округления в большую сторону до целого значения.

**Задача № 2.14.** Сталь марки 40Х разливается из 250-т сталеразливочного ковша на 4-х ручьевой МНЛЗ вертикального типа. Поперечное сечение заготовок 260x300 мм. Каким должен быть диаметр стакана в сталеразливочном ковше для того, чтобы можно было поддерживать скорость вытягивания заготовок в пределах 0,4...0,8 м/мин?

Решение.

Формулу для определения диаметра стакана в стальковше имеет вид

$$d = \sqrt{\frac{q}{1.2 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{h_M}}}$$

Скорость разлива (т/мин) через один ручей можно найти из выражения

$$q = a \cdot b \cdot \rho_{мет} \cdot W.$$

Поскольку скорость разлива стали регулируется стопорным механизмом промковша, то расчет диаметра канала разливочного стакана сталеразливочного стакана следует на максимальную скорость вытягивания заготовки –  $W = 0,8$  м/мин.

При скорости вытягивания  $W = 0,8$  м/мин и плотности металла  $7,6$  т/м<sup>3</sup> скорость разлива стали через 1 ручей составит

$$q = 0,26 \cdot 0,30 \cdot 7,6 \cdot 0,8 \cdot 1 = 0,474 \text{ т/мин.}$$

На четырех ручьях суммарная скорость разливки равна  $q_{\Sigma} = 0,474 \cdot 4 = 1,9$  т/мин. Это и будет максимальная скорость разливки из сталеразливочного ковша.

Для поддержания максимальной скорости вытягивания на протяжении разливки всей плавки необходимо вести расчет диаметра стакана при минимальном остаточном уровне металла в сталеразливочном ковше из диапазона 0,5-0,7 м. Принимаем  $h_m = 0,5$  м.

Тогда диаметр стакана равен

$$d = \sqrt{\frac{1,9}{1,2 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{0,5}}} = 47,3 \text{ мм} \approx 50 \text{ мм.}$$

**Задача № 2.15.** Сталь марки 15 разливается из 250-т сталеразливочного ковша на 4-х ручьевой МНЛЗ криволинейного типа. Поперечное сечение слябов 200x750 мм. Каким должен быть диаметр канала разливочного стакана в промежуточном ковше для того, чтобы можно было поддерживать скорость вытягивания слябов из кристаллизатора в пределах 0,4...1,0 м/мин?

Решение.

Формулу для определения диаметра стакана в промковше имеет вид

$$d = \sqrt{\frac{q}{1,1 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{h_m}}}.$$

Скорость разливки (т/мин) через один ручей можно найти из выражения

$$q = a \cdot b \cdot \rho_{\text{мет}} \cdot W.$$

Поскольку регулирование скорости разливки возможно стопорным механизмом в сторону уменьшения то расчет диаметра разливочного стакана промежуточного ковша на максимальную скорость вытягивания заготовки –  $W = 1,0$  м/мин.

При скорости вытягивания  $W = 1,0$  м/мин и плотности металла  $7,6 \text{ т/м}^3$  скорость разливки стали через 1 ручей составит

$$q = 0,20 \cdot 0,75 \cdot 7,6 \cdot 1,0 = 1,14 \text{ т/мин.}$$

Это и будет максимальная скорость разливки из промежуточного ковша через один ручей.

Для поддержания небольшого и постоянного напора струи металла, подаваемого из промковша в кристаллизатор, уровень металла в промковше поддерживается постоянным – в зависимости от конструкции от 0,8 до 1,2 м. Принимаем расчетный уровень металла в промковше равным  $h_m = 1,0$  м.

Тогда диаметр разливочного стакана равен

$$d = \sqrt{\frac{1,14}{1,1 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{1,0}}} = 32,2 \approx 35 \text{ мм.}$$

## 2.5 Задачи для самостоятельного решения

**Задача № 2.16.** Определить толщину слоя затвердевшего металла на выходе из кристаллизатора длиной 1200 мм и в середине каждой секции ЗВО длиной 0,2; 1; 2; 4,2; 5; 6 м, и продолжительность затвердевания НЛЗ при непрерывной разливке на МНЛЗ криволинейного типа. Марка стали, размеры заготовки и скорость вытягивания указаны в таблице 5.

Таблица 5 – Варианты заданий для задач №№ 2.16-2.18

№ вар.	Марка стали	Сечение кристаллизатора b × a, мм × мм	Рабочая скорость вытягивания, м/мин
1	Ст3сп	125 × 125	2,0
2	09Г2С	125 × 125	1,8
3	35ГС	125 × 125	1,6
4	17Г1СУ	200 × 1100	0,6
5	15ХСНД	250 × 1200	0,55
6	10ХСНДА	300 × 1350	0,5
7	Ст3сп	200 × 1100	0,7
8	Ст2сп	300 × 1350	0,6
9	20Х	300 × 450	0,64
10	35ХГСА	300 × 450	0,5
11	12ХНЗА	300 × 450	0,45
12	20	140 × 140	1,5
13	45	160 × 160	1,3
14	50	300 × 400	0,75
15	15ХСНДА	300 × 360	0,55

**Задача № 2.17.** МНЛЗ криволинейного типа имеет длину кристаллизатора 1000 мм и шестисекционную ЗВО. Длина секций равна 0,2; 0,8; 2,4; 4,0; 6,2 и 7 м. В НЛЗ, обнаружены гнездообразные трещины на расстоянии 60...70 мм от поверхности. В какой секции(ях) на поверхность сляба подается недостаточно охладителя?

Марка стали, размеры заготовки и скорость вытягивания указаны в таблице 5.

**Задача № 2.18.** Определить среднюю скорость затвердевания и глубину лунки жидкого металла в НЛЗ, отливаемой на криволинейной МНЛЗ. Марка стали, размеры заготовки и скорость вытягивания указаны в таблице 5.

**Задача № 2.19.** Сталь марки Ст.Зсп разливается из сталеразливочного ковша на МНЛЗ криволинейного типа. Поперечное сечение НЛЗ, скорость вытягивания и масса плавки приведены в таблице 6. Определить:

- продолжительность затвердевания заготовки;
- глубину лунки жидкого металла и требуемую металлургическую длину МНЛЗ;
- продолжительность разливки плавки;
- производительность МНЛЗ.

Таблица 6 – Варианты заданий для задач №№ 2.19 и 2.20

№ вар.	Емкость ковша, т	Рабочая скорость вытягивания, м/мин	Сечение НЛЗ, мм×мм	Количество ручьев МНЛЗ
1	200	2,0	125×125	6
2	250	1,2	250×1250	2
3	250	1,0	200×1400	2
4	200	1,4	200×1100	2
5	250	1,2	250×1200	2
6	120	1,0	300×1350	2
7	160	1,6	200×1100	2
8	160	1,2	300×1350	2
9	120	0,7	300×450	4
10	320	1,3	300×1450	2
11	350	0,6	300×450	4
12	150	1,8	140×140	8
13	350	1,6	160×160	6
14	250	0,5	300×400	4
15	150	0,6	300×360	4

**Задача № 2.20.** Сталь марки 40Х разливается из сталеразливочного ковша на МНЛЗ вертикального типа. Определить диаметры стаканов в сталеразливочном и промежуточном ковшах, обеспечивающих рабочую скорость вытягивания заготовок из кристаллизатора. Необходимые для расчета данные приведены в таблице 6.

**Задача № 2.21.** Двухручьева МНЛЗ криволинейного типа имеет длину кристаллизатора 1200 мм и семи-секционную зону вторичного охлаждения. Длина секций составляет соответственно 0,85; 1,15; 1,9; 2,4; 4,8; 6,5 и 8,2 м. Криволинейный участок начинается с четвертой секции. С какой скоростью можно производить вытягивание заготовки из стали марки 18ХГТ (сечение 250x1100мм) на этой МНЛЗ, если для получения плотной макроструктуры промежуточной зоны выпрямление заготовки следует производить после образования слоя затвердевшего металла толщиной не менее 75 мм?

## Рекомендуемая литература

1. Кудрин В.А. Теория и технология производства стали: Учебник для вузов. - М.: "Мир", ООО "Издательство АСТ", 2003. - 528 с.
2. Лисиенко, В.Г., Самойлович Ю.А. Теплотехнические основы технологии и конструирования машин непрерывного литья заготовок. – Красноярск: Изд-во Красноярского ун-та, 1986. – 120 с.
3. Нормы технологического проектирования и технико-экономические показатели отделений и установок непрерывной разливки стали (ВНТМ 1-5-76). – М.: Гипромез, 1976. – 136 с.
4. Сталеплавильное производство. / Справочник, т.1. Под ред. А.М. Самарина – М.: Металлургия, 1964. – 476 с.
5. Столяров А.М., Селиванов В.Н. Технологические расчеты по непрерывной разливке стали: учеб. пособие. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск, гос. тех. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. – 67 с.
6. Шаповалов А.Н. Проектирование стального слитка: Методические указания для выполнения курсового проекта. – Новотроицк: НФ НИТУ «МИСиС», 2016. – 43с.
7. Шаповалов А. Н. Расчет параметров непрерывной разливки стали: Методические указания для выполнения курсовой работы. – Новотроицк, НФ НИТУ «МИСиС», 2020. – 53с.

ШАПОВАЛОВ АЛЕКСЕЙ НИКОЛАЕВИЧ

## РАЗЛИВКА И КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ СТАЛИ

Методические указания для проведения практических занятий  
и самостоятельной работы студентов  
по дисциплинам «Разливка и кристаллизация стали» и  
«Теория и технология разливки стали»

Направление подготовки: 22.03.02 Metallургия  
Квалификация (степень) выпускника: бакалавр  
Форма обучения: очная, заочная

Подписано в печать 17.03.2021 г.		
Формат 60x90 $\frac{1}{16}$ Рег. № 226	Печать цифровая Тираж 10 экз.	Уч.-изд.л. 3,94

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет  
«МИСиС»  
Новотроицкий филиал  
462359, Оренбургская область, г. Новотроицк, ул. Фрунзе, 8.  
E-mail: [nf@misis.ru](mailto:nf@misis.ru)  
Контактный тел. 8 (3537) 67-97-29

