



**Рецензенты:**

Кандидат технических наук,  
начальник лаборатории непрерывной разливки стали,  
ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»

***Д.В. Юречко***

Доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры литейного производства и материаловедения,  
ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический  
университет им. Г.И. Носова»

***В.П. Чернов***

**Столяров А.М., Селиванов В.Н.**

**Технологические расчеты по непрерывной разливке стали** [Электронный ресурс] : учебное пособие / Александр Михайлович Столяров, Валентин Николаевич Селиванов ; ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». – Изд. 2-е, подгот. по печ. изд. 2011 г. – Электрон. текстовые дан. (0,97 Мб). – Магнитогорск : ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2015. – 1 электрон. опт. диск (CD-R). – Систем. требования : IBM PC, любой, более 1 GHz ; 512 Мб RAM ; 10 Мб HDD ; MS Windows XP и выше ; Adobe Reader 8.0 и выше ; CD/DVD-ROM дисковод ; мышь. – Загл. с титул. экрана.

В работе приведены краткие теоретические сведения в разделах: затвердевание непрерывнолитой заготовки; гидродинамика истечения металла из ковша; параметры качания кристаллизатора; охлаждение заготовки в кристаллизаторе МНЛЗ; продолжительность разливки металла одной плавки и годовая производительность МНЛЗ. Рассмотрены варианты выполнения заданий по расчёту следующих параметров: толщины слоя затвердевшего металла и скорости его затвердевания при нахождении заготовки в различных местах по технологической длине машины; протяженности лунки жидкого металла внутри заготовки; весовой скорости разливки стали; диаметра канала стаканов в промежуточном и сталеразливочном ковшах; частоты качания кристаллизатора МНЛЗ; максимальной скорости вытягивания заготовки из кристаллизатора; расхода воды на охлаждение кристаллизатора; продолжительности полного затвердевания непрерывнолитой заготовки; продолжительности разливки металла одной плавки и годовой производительности МНЛЗ. Представлена краткая характеристика восьми вариантов различных МНЛЗ, которые в качестве исходных данных могут быть использованы при проведении расчетов технологических параметров непрерывной разливки стали.

Работа предназначена для студентов вузов, обучающихся по направлению «Металлургия».

УДК 621.746.5.047

© Столяров А.М., Селиванов В.Н., 2011  
© ФГБОУ ВПО «Магнитогорский  
государственный технический  
университет им. Г.И. Носова», 2011

## Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ЗАТВЕРДЕВАНИЕ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ.....	6
1.1. Задание первое.....	10
Вариант выполнения первого задания.....	10
1.2. Задание второе.....	18
Вариант выполнения второго задания.....	18
1.3. Задание третье.....	19
Вариант выполнения третьего задания.....	20
1.4.Задание четвертое.....	22
Вариант выполнения четвертого задания.....	22
1.5.Задание пятое.....	23
Вариант выполнения пятого задания.....	23
1.6. Задание шестое.....	25
Вариант выполнения шестого задания.....	25
ГЛАВА 2. ГИДРОДИНАМИКА ИСТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА ИЗ КОВША.....	26
2.1. Задание седьмое.....	28
Вариант выполнения седьмого задания.....	28
2.2. Задание восьмое.....	29
Вариант выполнения восьмого задания.....	29
ГЛАВА 3. ПАРАМЕТРЫ КАЧАНИЯ КРИСТАЛЛИЗАТОРА.....	31
3.1. Задание девятое.....	32
Вариант выполнения девятого задания.....	32
3.2. Задание десятое.....	35
Вариант выполнения десятого задания.....	35
ГЛАВА 4. ОХЛАЖДЕНИЕ ЗАГОТОВКИ В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ МНЛЗ.....	38
4.1. Задание одиннадцатое.....	42
Вариант выполнения одиннадцатого задания.....	42
4.2. Задание двенадцатое.....	44
Вариант выполнения двенадцатого задания.....	44
4.3. Задание тринадцатое.....	45
Вариант выполнения тринадцатого задания.....	45
4.4. Задание четырнадцатое.....	47
Вариант выполнения четырнадцатого задания.....	47
ГЛАВА 5. ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ РАЗЛИВКИ МЕТАЛЛА ОДНОЙ ПЛАВКИ И ГОДОВАЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ МНЛЗ.....	49

5.1. Задание пятнадцатое.....	50
Вариант выполнения пятнадцатого задания.....	50
5.2. Задание шестнадцатое.....	52
Вариант выполнения шестнадцатого задания.....	52
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	53
РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	54
Приложение А. Характеристика слябовых МНЛЗ.....	55
Приложение В. Характеристика сортовых МНЛЗ.....	65

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наибольшая часть выплавляемой стали разливается на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Стабильность процесса непрерывной разливки стали на МНЛЗ, производительность машины и качество получаемых непрерывнолитых заготовок существенным образом определяется правильностью выбора технологических параметров процесса разливки. Современное состояние теории непрерывной разливки позволяет определить её основные технологические параметры расчётным путем. Расчёт технологических параметров непрерывной разливки стали всегда производится с учётом конструктивных особенностей конкретной МНЛЗ.

Студенты при изучении дисциплины «Разливка и кристаллизация стали» должны приобрести навыки и умения для выполнения технологических расчётов по непрерывной разливке стали.

В настоящей работе содержатся методические указания по расчёту как параметров, характеризующих внутреннее строение непрерывнолитой заготовки: толщины слоя затвердевшего металла и скорости его затвердевания при нахождении заготовки в различных местах по технологической длине машины; протяжённости лунки жидкого металла внутри заготовки; так и основных технологических параметров процесса разливки. К таким параметрам относятся: весовая скорость разливки стали; диаметр канала стаканов в промежуточном и сталеразливочном ковшах; частота качания кристаллизатора МНЛЗ; максимальная скорость вытягивания заготовки из кристаллизатора; расход воды на охлаждение кристаллизатора; продолжительность полного затвердевания непрерывнолитой заготовки; продолжительность разливки металла одной плавки; годовая производительность МНЛЗ.

Для выполнения расчёта значений вышеперечисленных параметров в работе приводятся краткие теоретические сведения с необходимыми формулами в следующих разделах:

- затвердевание непрерывнолитой заготовки;
- гидродинамика истечения металла из ковша;
- параметры качания кристаллизатора;
- охлаждение заготовки в кристаллизаторе МНЛЗ;
- продолжительность разливки металла одной плавки и годовая производительность МНЛЗ.

## ГЛАВА 1. ЗАТВЕРДЕВАНИЕ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ

Затвердевание непрерывнолитой заготовки начинается в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) при соприкосновении жидкой стали с внутренней поверхностью водоохлаждаемого кристаллизатора. Толщина слоя затвердевшего металла постепенно увеличивается с течением времени согласно закону квадратного корня

$$\xi = k_3 \sqrt{\tau}, \quad (1)$$

где  $\xi$  – толщина слоя затвердевшего металла, мм;  
 $k_3$  – коэффициент затвердевания стали, мм/мин<sup>0,5</sup>;  
 $\tau$  – продолжительность затвердевания слоя металла, мин.

На выходе из кристаллизатора вытягиваемая непрерывнолитая заготовка представляет собой «сосуд», стенки которого состоят из оболочки затвердевшего металла, с находящейся внутри него жидкой сталью (рис. 1).

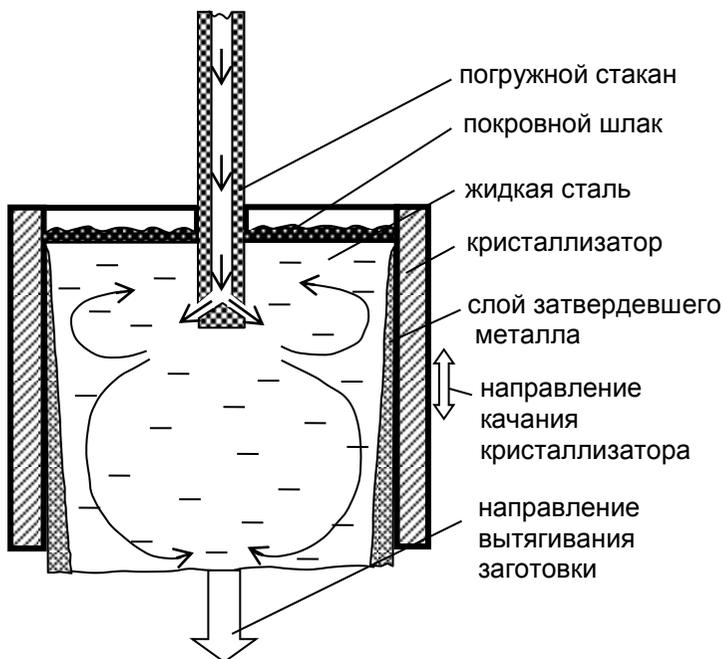


Рис. 1. Эскиз слябовой непрерывнолитой заготовки

С течением времени толщина слоя затвердевшего металла постепенно увеличивается в направлении от периферийной части заготовки к её осевой части. На рис. 2 схематично показано продвижение фронта кристаллизации в поперечном сечении слябовой и сортовой заготовок.

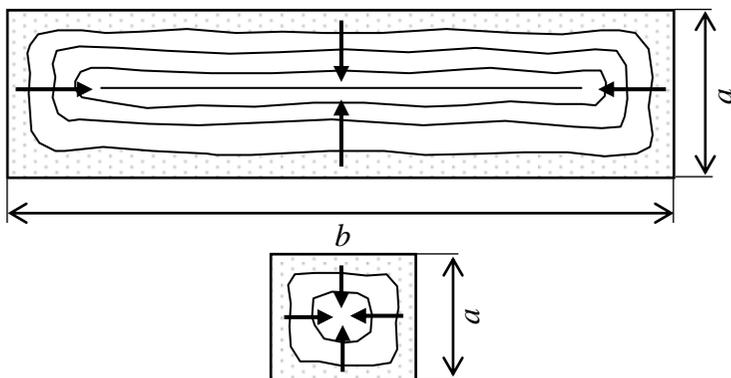


Рис. 2. Схематичное изображение продвижения фронта кристаллизации в поперечном сечении слябовой (вверху) и сортовой (внизу) непрерывнолитых заготовок:  $a$  – толщина;  $b$  – ширина заготовки

Из рис. 2 следует, что для полного затвердевания непрерывнолитой заготовки достаточно, чтобы слой затвердевшего металла оказался равен половине меньшего размера поперечного сечения заготовки, то есть её толщины. Продолжительность затвердевания заготовки вычисляется по формуле

$$\tau_3 = k_\phi \left( \frac{a}{2k_3} \right)^2, \quad (2)$$

где  $\tau_3$  – продолжительность затвердевания заготовки, мин;  
 $k_\phi$  – коэффициент формы поперечного сечения заготовки;  
 $a$  – толщина заготовки, мм.

В формуле (2) величина коэффициента формы поперечного сечения заготовки приблизительно определяется следующим образом:

для слябовой заготовки (при  $b/a > 2$ )  $k_\phi = 1$ ;

для сортовой заготовки (при  $1 \leq b/a \leq 2$ )

$$k_{\phi} = 0,5 + 0,25 \frac{b}{a}, \quad (3)$$

где  $b$  – ширина заготовки, мм.

Величина коэффициента затвердевания стали в формуле (2) зависит от величины перегрева стали в промежуточном ковше МНЛЗ над температурой начала затвердевания стали – температурой ликвидус и рассчитывается по уравнению

$$k_3 = 30 - 0,2\Delta t_{пер}, \quad (4)$$

где  $\Delta t_{пер}$  – величина перегрева стали, °С.

Величина перегрева стали определяется как разность между температурой металла в промежуточном ковше и температурой ликвидус разливаемой стали

$$\Delta t_{пер} = t_{нк} - t_{ликв}, \quad (5)$$

где  $t_{нк}$  – температура металла в промежуточном ковше, °С;

$t_{ликв}$  – температура ликвидус стали, °С.

Температура ликвидус стали зависит от её химического состава и рассчитывается по формуле

$$t_{ликв} = 1539 - 73[C] - 12[Si] - 3[Mn] - 30[S] - 28[P] - 1[Cr] - \\ - 3,5[Ni] - 7[Cu] - 3[Al] - 2[V] - 18[Ti] - 3[Mo] - \\ - 1,8[Co] - 1[W], \quad (6)$$

где 1539 – температура затвердевания чистого железа, °С;

73; 12; 3; 30; 28; 1; 3,5; 7; 3; 2; 18; 3; 1,8 и 1 – величины снижения температуры затвердевания железа при введении в него 1 %, соответственно, углерода, кремния, марганца, серы, фосфора, хрома, никеля, меди, алюминия, ванадия, титана, молибдена, кобальта и вольфрама, °С/%;

[C], [S], [Mn], [Si], [P], [Cr], [Ni], [Cu], [Al], [V], [Ti], [Mo], [Co], [W] – содержание в стали, соответственно, углерода, кремния, марганца, серы, фосфора, хрома, никеля, меди, алюминия, ванадия, титана, молибдена, кобальта и вольфрама, %.

При расчёте температуры ликвидус углеродистой стали в формуле (6) обычно учитывается только содержание углерода, кремния, марганца, серы и фосфора. В аналогичном расчёте для

**легированной** стали дополнительно учитывается содержание легирующих элементов в данной стали.

Средняя скорость затвердевания непрерывнолитой заготовки вычисляется по формуле

$$v_3 = \frac{\Delta \xi}{\Delta \tau}, \quad (7)$$

где  $v_3$  – средняя скорость затвердевания металла, *мм/мин*;  
 $\Delta \xi$  – прирост толщины слоя затвердевшего металла, *мм*;  
 $\Delta \tau$  – продолжительность времени, в течении которого произошёл прирост слоя металла, *мин*.

Протяжённость лунки жидкого металла в непрерывнолитой заготовке может быть определена по формуле

$$L_{\text{лс}} = \tau_3 \cdot w, \quad (8)$$

где  $L_{\text{лс}}$  – протяжённость лунки, *м*;  
 $\tau_3$  – продолжительность затвердевания заготовки, *мин*;  
 $w$  – скорость вытягивания заготовки из кристаллизатора, *м/мин*.

Обязательным условием безаварийной газовой резки непрерывнолитой заготовки является соблюдение соотношения

$$\frac{L_{\text{лс макс}}}{L_{\text{мет}}} \leq 0,9, \quad (9)$$

где  $L_{\text{мет}}$  – металлургическая длина МНЛЗ (расстояние по оси заготовки от поверхности жидкого металла в кристаллизаторе до:  
выхода из роликовых секций – для слябовых заготовок;  
входа в газорезку – для сортовых заготовок), *м*.

В случае несоблюдения условия (9) максимальную скорость вытягивания заготовки из кристаллизатора необходимо соответственно снизить.

## 1.1. Задание первое

Определить толщину слоя затвердевшего металла и скорость его затвердевания на выходе из кристаллизатора и каждой форсуночной секции при разливке стали марки 08Ю на криволинейной МНЛЗ по следующим исходным данным:

- размеры поперечного сечения сляба 250×1550 мм;
- высота кристаллизатора 1200 мм;
- длина форсуночных секций зоны вторичного охлаждения: 150, 720, 1290, 2560, 2900, 3900 мм;
- скорость вытягивания сляба из кристаллизатора 0,7 м/мин;
- температура металла в промежуточном ковше 1556 °С.

Построить графики зависимостей толщины слоя затвердевшего металла и скорости его затвердевания от продолжительности затвердевания сляба.

### Вариант выполнения первого задания

Расчёт толщины слоя затвердевшего металла производится с использованием формулы (1). В этой формуле неизвестными являются величины коэффициента затвердевания стали и продолжительности затвердевания слоя металла. Для определения величины коэффициента затвердевания стали следует использовать формулы (4...6).

На основании справочных данных из марочника в стали марки 08Ю согласно ГОСТ 9045-93 для категории вытяжки СВ содержание химических элементов должно быть следующим:

C	Si	Mn	S	P	Al
≤0,07;	≤0,03;	0,20...0,35;	≤0,025;	≤0,02;	0,02...0,07

Принимается, что в стали марки 08Ю содержится

C	Si	Mn	S	P	Al
0,06;	0,02;	0,30;	0,019;	0,015;	0,05.

Тогда температура ликвидус такой стали по формуле (6) будет равна

$$t_{ликв} = 1539 - 73 \cdot 0,06 - 12 \cdot 0,02 - 3 \cdot 0,3 - 30 \cdot 0,019 - 28 \cdot 0,015 - 3 \cdot 0,05 = 1532^\circ C.$$

Величина перегрева стали в промежуточном ковше по формуле (5) составит

$$\Delta t_{пер} = 1556 - 1532 = 24^\circ \text{C}.$$

Коэффициент затвердевания стали определяется по формуле (4)

$$k_3 = 30 - 0,2 \cdot 24 = 25 \text{ мм/мин}^{0,5}.$$

Продолжительность затвердевания слоя металла рассчитывается для каждой требуемой точки по длине ручья МНЛЗ как отношение расстояния от зеркала металла в кристаллизаторе до данной точки к скорости вытягивания сляба из кристаллизатора.

Принимается, что расстояние от зеркала металла в кристаллизаторе до верха медных пластин (так называемый недолив металла) составляет 100 мм. Тогда расстояние от зеркала металла до точки выхода сляба из кристаллизатора будет равно

$$h_1 = h_{кр} - h_{недол} = 1200 - 100 = 1100 \text{ мм}.$$

Толщина слоя затвердевшего металла в слябе на выходе его из кристаллизатора составит

$$\xi_1 = 25 \cdot \sqrt{\frac{1100/1000}{0,7}} = 25 \cdot \sqrt{1,57} = 31,3 \text{ мм}.$$

Вторая точка, соответствующая окончанию первой форсуночной секции ЗВО, будет находиться от зеркала металла в кристаллизаторе на расстоянии, равном

$$h_2 = h_1 + h_{секц1} = 1100 + 150 = 1250 \text{ мм}.$$

Толщина слоя затвердевшего металла в слябе на выходе из первой форсуночной секции составит

$$\xi_2 = 25 \cdot \sqrt{\frac{1250/1000}{0,7}} = 25 \cdot \sqrt{1,79} = 33,4 \text{ мм}.$$

Для третьей точки, соответствующей окончанию второй форсуночной секции ЗВО, будет равно

$$h_3 = h_1 + h_{секц1} + h_{секц2} = 1100 + 150 + 720 = 1970 \text{ мм}.$$

$$\xi_3 = 25 \cdot \sqrt{\frac{1970/1000}{0,7}} = 25 \cdot \sqrt{2,81} = 41,9 \text{ мм}.$$

Для четвёртой точки

$$\begin{aligned}h_4 &= h_1 + h_{\text{секц}1} + h_{\text{секц}2} + h_{\text{секц}3} = \\ &= 1100 + 150 + 720 + 1290 = 3260 \text{ мм.} \\ \xi_4 &= 25 \cdot \sqrt{\frac{3260/1000}{0,7}} = 25 \cdot \sqrt{4,66} = 54,0 \text{ мм.}\end{aligned}$$

Для пятой точки

$$\begin{aligned}h_5 &= h_1 + h_{\text{секц}1} + h_{\text{секц}2} + h_{\text{секц}3} + h_{\text{секц}4} = \\ &= 1100 + 150 + 720 + 1290 + 2560 = 5820 \text{ мм.} \\ \xi_5 &= 25 \cdot \sqrt{\frac{5820/1000}{0,7}} = 25 \cdot \sqrt{8,31} = 72,1 \text{ мм.}\end{aligned}$$

Для шестой точки

$$\begin{aligned}h_6 &= h_1 + h_{\text{секц}1} + h_{\text{секц}2} + h_{\text{секц}3} + h_{\text{секц}4} + h_{\text{секц}5} = \\ &= 1100 + 150 + 720 + 1290 + 2560 + 2900 = 8720 \text{ мм.} \\ \xi_6 &= 25 \cdot \sqrt{\frac{8720/1000}{0,7}} = 25 \cdot \sqrt{12,46} = 88,2 \text{ мм.}\end{aligned}$$

Для седьмой точки

$$\begin{aligned}h_7 &= h_1 + h_{\text{секц}1} + h_{\text{секц}2} + h_{\text{секц}3} + h_{\text{секц}4} + h_{\text{секц}5} + h_{\text{секц}6} = \\ &= 1100 + 150 + 720 + 1290 + 2560 + 2900 + 3900 = 12620 \text{ мм.} \\ \xi_7 &= 25 \cdot \sqrt{\frac{12620/1000}{0,7}} = 25 \cdot \sqrt{18,03} = 106,2 \text{ мм.}\end{aligned}$$

Рассчитанные значения толщины слоя затвердевшего металла заносятся в табл. 1.

Графически характер изменения толщины слоя затвердевшего металла в процессе затвердевания сляба из стали марки 08Ю представлен на рис. 3.

Таблица 1

Расчётные значения толщины слоя затвердевшего металла

Расстояние от поверхности металла в кристаллизаторе, <i>м</i>	Продолжительность затвердевания слоя, <i>мин</i>	Толщина слоя затвердевшего металла, <i>мм</i>
0	0	0
1,1	1,57	31,3
1,25	1,79	33,4
1,97	2,81	41,9
3,26	4,66	54,0
5,82	8,31	72,1
8,72	12,46	88,2
12,62	18,03	106,2

Анализ рис. 3 показывает, что толщина слоя затвердевшего металла с течением времени увеличивается по кривой линии с уменьшающимся темпом прироста согласно зависимости квадратного корня.

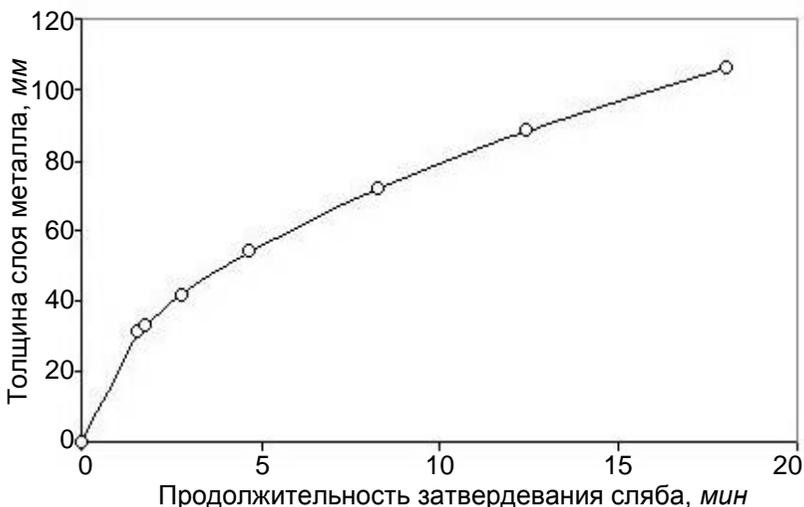


Рис. 3. Зависимость толщины слоя затвердевшего металла от продолжительности затвердевания сляба сечением 250×1550 мм из стали марки 08Ю

Следующим этапом выполнения задания является вычисление средней скорости затвердевания металла. Эти расчёты можно вести для различных условий. Выбираем вариант проведения расчётов в интервалах между заданными точками по длине ручья МНЛЗ.

В этом случае на выходе из кристаллизатора прирост толщины слоя затвердевшего металла будет находиться как разность между толщиной слоя на выходе из кристаллизатора и исходной толщиной слоя, равной нулю:

$$\Delta \xi_1 = \xi_1 - \xi_0 = 31,3 - 0 = 31,3 \text{ мм.}$$

Данный прирост произошёл за промежуток времени

$$\Delta \tau_1 = \tau_1 - \tau_0 = 1,57 - 0 = 1,57 \text{ мин.}$$

Тогда средняя скорость затвердевания металла будет равна

$$v_{3,1} = \frac{\Delta \xi_1}{\Delta \tau_1} = \frac{31,3}{1,57} = 19,94 \text{ мм/мин.}$$

Для второй точки на выходе из первой форсуночной секции ЗВО

$$\Delta \xi_2 = \xi_2 - \xi_1 = 33,4 - 31,3 = 2,1 \text{ мм.}$$

$$\Delta \tau_2 = \tau_2 - \tau_1 = 1,79 - 1,57 = 0,22 \text{ мин.}$$

$$v_{3,2} = \frac{\Delta \xi_2}{\Delta \tau_2} = \frac{2,1}{0,22} = 9,55 \text{ мм/мин.}$$

Для третьей точки

$$\Delta \xi_3 = \xi_3 - \xi_2 = 41,9 - 33,4 = 8,5 \text{ мм.}$$

$$\Delta \tau_3 = \tau_3 - \tau_2 = 2,81 - 1,79 = 1,02 \text{ мин.}$$

$$v_{3,3} = \frac{\Delta \xi_3}{\Delta \tau_3} = \frac{8,5}{1,02} = 8,33 \text{ мм/мин.}$$

Для четвёртой точки

$$\Delta \xi_4 = \xi_4 - \xi_3 = 54,0 - 41,9 = 12,1 \text{ мм.}$$

$$\Delta \tau_4 = \tau_4 - \tau_3 = 4,66 - 2,81 = 1,85 \text{ мин.}$$

$$v_{3,4} = \frac{\Delta \xi_4}{\Delta \tau_4} = \frac{12,1}{1,85} = 6,54 \text{ мм/мин.}$$

Для пятой точки

$$\Delta \xi_5 = \xi_5 - \xi_4 = 72,1 - 54,0 = 18,1 \text{ мм.}$$

$$\Delta \tau_5 = \tau_5 - \tau_4 = 8,31 - 4,66 = 3,65 \text{ мин.}$$

$$v_{3,5} = \frac{\Delta \xi_5}{\Delta \tau_5} = \frac{18,1}{3,65} = 4,96 \text{ мм/мин.}$$

Для шестой точки

$$\Delta \xi_6 = \xi_6 - \xi_5 = 88,2 - 72,1 = 16,1 \text{ мм.}$$

$$\Delta \tau_6 = \tau_6 - \tau_5 = 12,46 - 8,31 = 4,15 \text{ мин.}$$

$$v_{3,6} = \frac{\Delta \xi_6}{\Delta \tau_6} = \frac{16,1}{4,15} = 3,88 \text{ мм/мин.}$$

Для седьмой точки

$$\Delta \xi_7 = \xi_7 - \xi_6 = 106,2 - 88,2 = 18,0 \text{ мм.}$$

$$\Delta \tau_7 = \tau_7 - \tau_6 = 18,03 - 12,46 = 5,57 \text{ мин.}$$

$$v_{3,7} = \frac{\Delta \xi_7}{\Delta \tau_7} = \frac{18,0}{5,57} = 3,23 \text{ мм/мин.}$$

Из расчётных значений формируется табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчёта скорости затвердевания металла

Продолжительность затвердевания сляба, мин	Скорость затвердевания металла, мм/мин
1,57	19,94
1,79	9,55
2,81	8,33
4,66	6,54
8,31	4,96
12,46	3,88
18,03	3,23

Графическое изображение зависимости скорости затвердевания металла от продолжительности затвердевания сляба представлено на рис. 4.

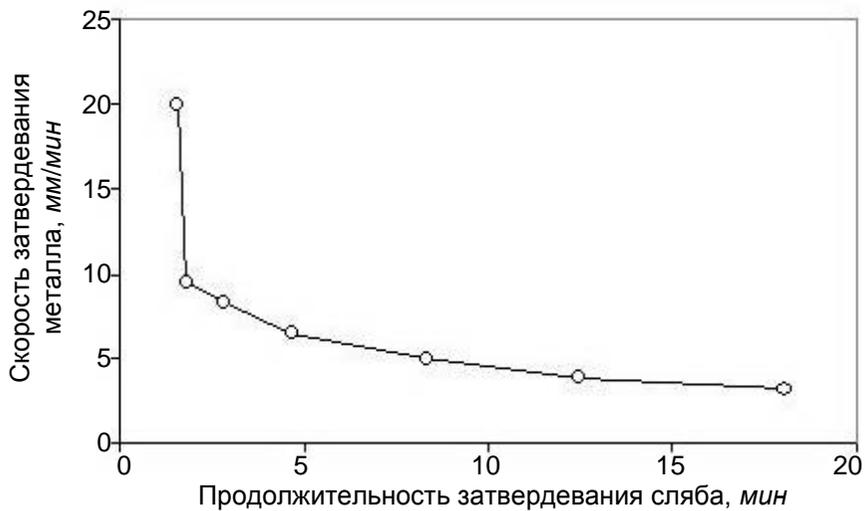


Рис. 4. Зависимость скорости затвердевания металла от продолжительности затвердевания сляба сечением  $250 \times 1550$  мм из стали марки 08Ю

При увеличении продолжительности затвердевания сляба скорость затвердевания металла снижается по гиперболической зависимости.

## 1.2. Задание второе

Определить, с какой скоростью следует производить вытягивание непрерывнолитой заготовки сечением 200×910 мм из кристаллизатора МНЛЗ, если для безаварийной разливки на выходе из кристаллизатора нужно иметь слой затвердевшего металла толщиной не менее 25 мм. Высота кристаллизатора двухручьевого МНЛЗ вертикального типа равна 1000 мм. Температура стали марки 30Г в промежуточном ковше составляет 1533 °С.

### Вариант выполнения второго задания

В стали марки 30Г по ТУ 14-4-156-72 содержание химических элементов должно быть следующим:

C	Si	Mn	S	P
0,28...0,35;	0,17...0,37;	0,7...1,0;	≤0,030;	≤0,025.

Принимается, что в стали марки 30Г содержится

C	Si	Mn	S	P
0,31;	0,28;	0,85;	0,017;	0,014.

Температура ликвидус стали, вычисленная по формуле (6), будет равна

$$t_{ликв} = 1539 - 73 \cdot 0,31 - 12 \cdot 0,28 - 3 \cdot 0,85 - 30 \cdot 0,017 - 28 \cdot 0,014 = 1510^{\circ} C.$$

Величина перегрева стали в промежуточном ковше по формуле (5) составит

$$\Delta t_{неп} = 1533 - 1510 = 23^{\circ} C.$$

Коэффициент затвердевания стали определяется по формуле (4)

$$k_s = 30 - 0,2 \cdot 23 = 25,4 \text{ мм/мин}^{0,5}.$$

С использованием формулы (1) можно определить продолжительность времени, в течение которого затвердевает слой металла толщиной 25 мм, обеспечивающий безаварийную разливку металла и оговоренный в задании

$$\tau = \left( \frac{\xi}{k_3} \right)^2 = \left( \frac{25}{25,4} \right)^2 = 0,97 \text{ мин.}$$

Вычисленное значение характеризует продолжительность нахождения залитого металла в кристаллизаторе МНЛЗ. Величина этой продолжительности также может быть найдена по формуле

$$\tau = \frac{h_{кр} - h_{недол}}{w}.$$

Преобразовав эту формулу и приняв величину недолива металла в кристаллизаторе, равной 100 мм, можно найти искомую скорость вытягивания заготовки из кристаллизатора

$$w = \frac{h_{кр} - \Delta h_{нед}}{\tau} = \frac{(1000 - 100) / 1000}{0,97} = 0,93 \text{ м/мин.}$$

Таким образом, разливку стали марки 30Г на непрерывнолитые заготовки сечением 200×910 мм из кристаллизатора для обеспечения безаварийной работы двухручьевой вертикальной МНЛЗ следует производить со скоростью, не превышающей 0,93 м/мин.

### 1.3. Задание третье

Определить, в какой (каких) форсуночной секции (секциях) ЗВО двухручьевой МНЛЗ криволинейного типа на поверхность сляба подаётся недостаточное количество охладителя. В слябе из стали марки Ст.2сп сечением 240×1500 мм обнаружены гнездообразные трещины на расстоянии 40...55 мм от поверхности. Причина их образования – разогрев поверхности заготовки вследствие недостаточного расхода охладителя в одной или нескольких форсуночных секциях. Высота кристаллизатора составляет 1000 мм. Длина шести форсуночных секций равна 0,2; 0,8; 2,4; 4,0; 5,2; 6,8 м. Сляб вытягивается со скоростью 0,8 м/мин. Температура металла в промежуточном ковше составляет 1545 °С.

### Вариант выполнения третьего задания

Гнездообразная трещина начинается в слябе на расстоянии 40 мм от поверхности. Определим время, за которое сформировался слой затвердевшего металла такой толщины. Для этого преобразуем формулу (1)

$$\tau_1 = \left( \frac{\xi}{k_3} \right)^2.$$

Неизвестна величина коэффициента затвердевания стали. В стали марки Ст.2сп по ГОСТ 14637-89 содержание химических элементов должно быть следующим:

C	Si	Mn	S	P
0,09...0,15;	0,15...0,30;	0,3...0,5;	≤0,030;	≤0,025;

Принимается, что в стали марки Ст.2сп содержится

C	Si	Mn	S	P	I
0,12;	0,25;	0,44;	0,022;	0,019.	

Температура ликвидус стали по формуле (6) будет равна

$$t_{ликв} = 1539 - 73 \cdot 0,12 - 12 \cdot 0,25 - 3 \cdot 0,44 - 30 \cdot 0,022 - 28 \cdot 0,019 = 1525^\circ C.$$

Величина перегрева стали в промежуточном ковше по формуле (5) составит

$$\Delta t_{неп} = 1545 - 1525 = 20^\circ C.$$

Коэффициент затвердевания стали определяется по формуле (4)

$$k_3 = 30 - 0,2 \cdot 20 = 26 \text{ мм/мин}^{0,5}.$$

Рассчитывается время

$$\tau_1 = \left( \frac{\xi}{k_3} \right)^2 = \left( \frac{40}{26} \right)^2 = 2,37 \text{ мин.}$$

За это время сляб переместится на расстояние

$$L_1 = \tau_1 \cdot w = 2,37 \cdot 0,8 = 1,9 \text{ м.}$$

Если принять величину недолива металла в кристаллизаторе 100 мм, то можно определить расстояние от зеркала ме-

талла в кристаллизаторе до различных точек на технологической оси машины. Так, например, расстояние до входа во вторую секцию составит

$$L = 1,0 - 0,1 + 0,2 = 1,1 \text{ м},$$

а до входа в третью секцию

$$L = 1,0 - 0,1 + 0,2 + 0,8 = 1,9 \text{ м}.$$

Так как расстояние  $L_1$  равно расстоянию от зеркала металла в кристаллизаторе до входа в третью секцию, то можно сделать вывод, что зарождение гнездообразных трещин в слябе началось при вхождении сляба в третью форсуночную секцию.

Аналогичный расчёт проводится для слоя затвердевшего металла, равного 55 мм, в котором завершилось формирование трещин.

Рассчитывается время

$$\tau_2 = \left( \frac{\xi_2}{k_3} \right)^2 = \left( \frac{55}{26} \right)^2 = 4,47 \text{ мин.}$$

За это время сляб переместится на расстояние

$$L_2 = \tau_2 \cdot w = 4,47 \cdot 0,8 = 3,6 \text{ м}.$$

Расстояние от зеркала металла в кристаллизаторе до входа в четвёртую секцию составит

$$L_4 = 1,0 - 0,1 + 0,2 + 0,8 + 2,4 = 4,3 \text{ м}.$$

Так как расстояние до входа в четвёртую секцию больше расстояния, на котором завершилось формирование трещин, то таким образом установлено, что недостаточное количество охладителя подавалось на поверхность сляба в третьей форсуночной секции. Следует произвести увеличение расхода охладителя в этой секции с целью устранения причин образования гнездообразных трещин.

#### 1.4. Задание четвёртое

Определить продолжительность затвердевания слябовой непрерывнолитой заготовки и протяжённость лунки жидкого металла в ней при разливке стали марки 17Г1С–У на криволинейной МНЛЗ с вертикальным участком по следующим исходным данным:

- размеры поперечного сечения сляба 300×2500 мм;
- скорость вытягивания сляба из кристаллизатора 0,55 м/мин;
- температура металла в промежуточном ковше 1537 °С.

#### Вариант выполнения четвёртого задания

Расчёт продолжительности затвердевания сляба производится с использованием формулы (2). Для вычисления по этой формуле необходимо знать значения коэффициента формы поперечного сечения заготовки, толщины заготовки и коэффициента затвердевания стали.

Для слябовой заготовки

$$\frac{b}{a} = \frac{2500}{300} = 8,3.$$

Так как  $\frac{b}{a} > 2$ , то коэффициент формы слябовой заготовки равен единице:  $k_{\phi} = 1$ .

Толщина отливаемого сляба составляет  $a = 300$  мм.

На основании справочных данных из марочника в стали марки 17Г1С–У согласно ТУ 14-1-1950-2004 содержание химических элементов должно быть следующим:

С	Si	Mn	S	P
0,15...0,20;	0,40...0,60;	1,15...1,55;	≤0,020;	≤0,025;

Принимается, что в стали марки 17Г1С–У содержится

С	Si	Mn	S	P
0,18;	0,52;	1,43;	0,011;	0,017.

Тогда температура ликвидус такой стали по формуле (6) будет равна

$$t_{ликв} = 1539 - 73 \cdot 0,18 - 12 \cdot 0,52 - 3 \cdot 1,43 - 30 \cdot 0,011 - 28 \cdot 0,017 = 1515^{\circ} \text{C}.$$

Величина перегрева стали в промежуточном ковше по формуле (5) составит

$$\Delta t_{пер} = 1537 - 1515 = 22^\circ \text{C}.$$

Коэффициент затвердевания стали определяется по формуле (4)

$$k_3 = 30 - 0,2 \cdot 22 = 25,6 \text{ мм/мин}^{0,5}.$$

Тогда продолжительность затвердевания слябовой непрерывнолитой заготовки рассчитывается следующим образом:

$$\tau_3 = 1 \cdot \left( \frac{300}{2 \cdot 25,6} \right)^2 = 34,3 \text{ мин}.$$

Протяжённость лунки жидкого металла вычисляется по формуле (8)

$$L_{лс} = 34,3 \cdot 0,55 = 18,9 \text{ м}.$$

### 1.5. Задание пятое

Определить продолжительность затвердевания сортовой непрерывнолитой заготовки и протяжённость лунки жидкого металла в ней при разливке стали марки 40X на радиальной МНЛЗ по следующим исходным данным:

- размеры поперечного сечения заготовки 160×180 мм;
- скорость вытягивания заготовки из кристаллизатора 2,0 м/мин;
- температура металла в промежуточном ковше 1520 °С.

#### Вариант выполнения пятого задания

Расчёт продолжительности затвердевания сортовой заготовки производится с использованием формулы (2). Для вычисления по этой формуле необходимо знать значения коэффициента формы поперечного сечения заготовки, толщины заготовки и коэффициента затвердевания стали.

Для сортовой заготовки

$$\frac{b}{a} = \frac{180}{160} = 1,125.$$

По формуле (3) вычисляется значение коэффициента формы поперечного сечения заготовки:

$$k_{\phi} = 0,5 + 0,25 \cdot 1,125 = 0,78.$$

Толщина отливаемой заготовки составляет 160 мм.

В стали марки 40X по ГОСТ 4543-71 содержание химических элементов должно быть следующим:

C	Si	Mn	S	P	Cr
0,36...0,44;	0,17...0,37;	0,5...0,8;	≤0,030;	≤0,025;	0,8...1,1.

Принимается, что в стали марки 40X содержится

C	Si	Mn	S	P	Cr
0,41;	0,29;	0,64;	0,023;	0,015;	0,97.

Температура ликвидус такой стали по формуле (6) будет равна

$$t_{ликв} = 1539 - 73 \cdot 0,41 - 12 \cdot 0,29 - 3 \cdot 0,64 - 30 \cdot 0,023 - 28 \cdot 0,015 - 1 \cdot 0,97 = 1502^{\circ} C.$$

Величина перегрева стали в промежуточном ковше по формуле (5) составит

$$\Delta t_{пер} = 1520 - 1502 = 18^{\circ} C.$$

Коэффициент затвердевания стали определяется по формуле (4)

$$k_3 = 30 - 0,2 \cdot 18 = 26,4 \text{ мм/мин}^{0,5}.$$

Тогда продолжительность затвердевания сортовой непрерывнолитой заготовки рассчитывается следующим образом:

$$\tau_3 = 0,78 \cdot \left( \frac{160}{2 \cdot 26,4} \right)^2 = 7,2 \text{ мин.}$$

Протяжённость лунки жидкого металла вычисляется по формуле (8)

$$L_{ж} = 7,2 \cdot 2,0 = 14,4 \text{ м.}$$

## 1.6. Задание шестое

Для условий четвёртого задания определить максимальную скорость вытягивания слябовой непрерывнолитой заготовки из кристаллизатора, если металлургическая длина МНЛЗ равняется 30 м.

### Вариант выполнения шестого задания

Для соблюдения условия безаварийной газовой резки непрерывнолитой заготовки необходимо выполнение соотношения, регламентированного формулой (9). Преобразовав эту формулу, можно получить выражение для расчёта максимальной длины лунки жидкого металла и определить её величину:

$$L_{ж.макс} = 0,9 \cdot L_{мет} = 0,9 \cdot 30 = 27 м.$$

Из приведённого выше варианта выполнения четвёртого задания известно, что продолжительность затвердевания слябовой заготовки равнялась 34,3 мин.

Тогда после преобразования формулы (8) определяется максимальная скорость вытягивания заготовки из кристаллизатора:

$$w = \frac{L_{ж.макс}}{\tau_3} = \frac{27}{34,3} = 0,79 м / мин.$$

## ГЛАВА 2. ГИДРОДИНАМИКА ИСТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА ИЗ КОВША

Схема истечения металла из сталеразливочного ковша представлена на рис. 5.

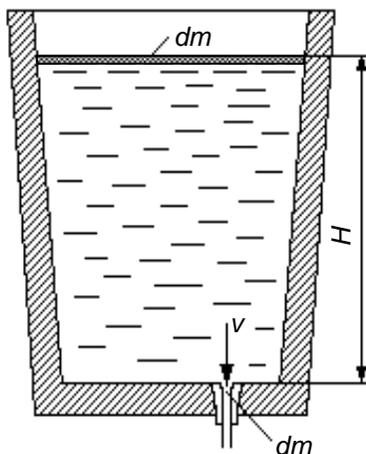


Рис. 5. Схема истечения металла из ковша

Рассмотрим изменения, происходящие в системе «ковш–металл» за какой-либо бесконечно малый промежуток времени  $dt$ . За это время некоторое количество жидкого металла массой  $dm$  из нижней части ковша перейдет в канал сталеразливочного стакана, где будет двигаться со скоростью  $v$ . Уровень металла в ковше при этом несколько понизится. Потенциальная энергия металла, находящегося на поверхности, превращается в кинетическую энергию металла, движущегося в канале стакана.

Потенциальная энергия массы  $dm$ , находящейся на поверхности металла в верхней части ковша относительно канала стакана, составляет

$$dE_n = dm \cdot g \cdot H, \quad (10)$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести,  $m/c^2$ ;

$H$  – высота слоя жидкого металла в ковше,  $m$ .

Кинетическая энергия такой же массы, движущейся в канале стакана со скоростью  $v$  ( $m/c$ ), равна

$$dE_{\kappa} = \frac{dm \cdot v^2}{2}. \quad (11)$$

Приравняв правые части выражений (10) и (11) и проведя простые преобразования, получим формулу для расчёта скорости движения струи металла в канале стакана

$$v = \sqrt{2gH}. \quad (12)$$

Весовая скорость разливки стали может быть определена по формуле

$$q = \rho_{\text{жс}} \cdot S \cdot v \cdot 60, \quad (13)$$

где  $q$  – весовая скорость разливки стали,  $т/мин$ ;

$\rho_{\text{жс}}$  – плотность жидкой стали,  $т/м^3$ ;

$S$  – площадь поперечного сечения канала стакана,  $м^2$ ;

$60$  – количество секунд в минуте.

Подставив в формулу (13) величину скорости движения струи металла в канале стакана из формулы (12) и выразив площадь поперечного сечения канала стакана через его диаметр, получим

$$q = 60 \cdot \rho_{\text{см}} \frac{\pi D^2 \cdot 10^{-6}}{4} \cdot \sqrt{2gH}, \quad (14)$$

где  $D$  – диаметр канала стакана,  $мм$ .

Введя обозначение коэффициента весовой скорости разливки  $K_c$ , имеющего размерность  $т/(мм^2 \cdot м^{0,5} \cdot мин)$  и вычисляемого по формуле

$$K_c = 60 \cdot \rho_{\text{см}} \frac{\pi \cdot 10^{-6}}{4} \cdot \sqrt{2g}, \quad (15)$$

получим зависимость

$$q = K_c \cdot D^2 \cdot H^{0,5}. \quad (16)$$

По формуле (15) для низкоуглеродистой стали, имеющей в жидком состоянии плотность  $7,0 т/м^3$ , можно вычислить значение коэффициента весовой скорости разливки  $K_c$ , которое будет равно  $1,46 \cdot 10^{-3} т/(мм^2 \cdot м^{0,5} \cdot мин)$ . Это теоретическое значение коэффициента скорости разливки стали, при определении которого не учитывается влияние на процесс истечения металла из ковша потери части энергии на преодоление сил внутреннего трения в жидком металле и сопротивление движению струи по

каналу стакана, неполное заполнение канала турбулентной струёй и др.

Поэтому для фактических условий разливки рекомендуется принимать следующие значения коэффициента весовой скорости разливки:

для сталеразливочного ковша  $K_c = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ т}/(\text{мм}^2 \cdot \text{м}^{0,5} \cdot \text{мин})$ ;

для промежуточного ковша  $K_c = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ т}/(\text{мм}^2 \cdot \text{м}^{0,5} \cdot \text{мин})$ .

## 2.1. Задание седьмое

Определить диаметр канала стакана сталеразливочного ковша для того, чтобы можно было поддерживать скорость вытягивания заготовок из кристаллизатора четырёхручьевого МНЛЗ криволинейного типа в интервале  $0,4 \dots 1,0 \text{ м}/\text{мин}$ . Сталь марки Ст.1пс разливается из 250-т сталеразливочного ковша на слябы с поперечным сечением  $220 \times 810 \text{ мм}$ .

### Вариант выполнения седьмого задания

Диаметр канала стакана сталеразливочного ковша должен быть такого размера, чтобы была возможной разливка металла на всех четырёх ручьях машины с максимальной из заявленного в задании интервала скоростью вытягивания заготовки из кристаллизатора. Плотность металла заготовки на выходе из зоны вторичного охлаждения МНЛЗ принимается равной  $7,5 \text{ т}/\text{м}^3$ . Рассчитывается максимально возможная весовая скорость разливки металла на одном ручье

$$q_{\text{ручья}} = a \cdot b \cdot w \cdot \rho_{\text{ст}} = 0,22 \cdot 0,81 \cdot 1,0 \cdot 7,5 = 1,34 \text{ т}/\text{мин}.$$

Суммарная весовая скорость разливки на всех ручьях составит

$$q = q_{\text{ручья}} \cdot N = 1,34 \cdot 4 = 5,36 \text{ т}/\text{мин}.$$

Формулу (16) можно преобразовать для определения диаметра стакана сталеразливочного ковша

$$D_{\text{ск}} = \sqrt{\frac{q}{K_c \cdot H^{0,5}}}. \quad (17)$$

На основании вышеприведённых рекомендаций для сталеразливочного ковша принимается значение коэффициента весовой скорости разливки  $K_c = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}/(\text{мм}^2 \cdot \text{м}^{0,5} \cdot \text{мин})$ .

В сталеразливочном ковше высота металла, при которой рассчитывается диаметр канала стакана, должна обеспечивать минимально необходимый напор жидкости и обычно принимается равной около одного метра.

Тогда по формуле (17)

$$D_{ск} = \sqrt{\frac{5,36}{1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 1,0^{0,5}}} = 66,8 \text{ мм.}$$

Полученное значение диаметра канала стакана округляется в большую сторону до значения, кратного 5 мм. Таким образом, получается диаметр канала стакана сталеразливочного ковша, равный 70 мм.

## 2.2. Задание восьмое

Определить диаметр канала стакана промежуточного ковша для того, чтобы можно было поддерживать скорость вытягивания заготовок из кристаллизатора шестиручьевой МНЛЗ радиального типа в интервале 2,0...3,2 м/мин. Сталь марки Ст.3сп разливается из 180-т сталеразливочного ковша на заготовки с поперечным сечением 140×140 мм.

### Вариант выполнения восьмого задания

Диаметр канала стакана промежуточного ковша должен быть такого размера, чтобы была возможной разливка металла на каждом ручье машины с максимальной из заявленного интервала в задании скоростью вытягивания заготовки из кристаллизатора. Принимается плотность металла заготовки, равная 7,6 т/м<sup>3</sup>. Рассчитывается наибольшая весовая скорость разливки металла на ручье

$$q_{ручья} = a \cdot b \cdot w \cdot \rho_{ст} = 0,14 \cdot 0,14 \cdot 3,2 \cdot 7,6 = 0,48 \text{ т/мин.}$$

Формулу (16) можно преобразовать для определения диаметра стакана промежуточного ковша

$$D_{нк} = \sqrt{\frac{q_{ручья}}{K_c \cdot H^{0,5}}}. \quad (18)$$

На основании рекомендаций для промежуточного ковша принимается  $K_c = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ т}/(\text{мм}^2 \cdot \text{м}^{0,5} \cdot \text{мин})$ .

В промежуточном ковше высота жидкого металла обычно составляет 0,6...1,0 м. Для расчёта принимается высота металла, равная 0,8 м.

Тогда по формуле (18)

$$D_{нк} = \sqrt{\frac{0,48}{1,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,8^{0,5}}} = 22,1 \text{ мм}.$$

Полученное значение диаметра канала стакана округляется в большую сторону до целого значения. Таким образом, получается диаметр канала стакана промежуточного ковша, равный 23 мм.

### ГЛАВА 3. ПАРАМЕТРЫ КАЧАНИЯ КРИСТАЛЛИЗАТОРА

При определённых условиях возможно локальное прилипание затвердевшей оболочки заготовки к стенке кристаллизатора, вследствие чего образуется зона плотного контакта и корочка перестаёт скользить относительно стенки – происходит её зависание. При вытягивании заготовки в оболочке увеличиваются растягивающие напряжения, в результате чего в нижней части зоны плотного контакта оболочка может разорваться. В том случае, если за время нахождения заготовки в кристаллизаторе не произойдёт надёжного «залечивания» места разрыва новым затвердевшим металлом, то на выходе из кристаллизатора произойдёт аварийный прорыв жидкого металла.

Для предотвращения зависания затвердевшей оболочки заготовки на стенках кристаллизатора и её разрывов кристаллизатору придаётся непрерывное возвратно-поступательное движение, называемое качанием.

Придание кристаллизатору возвратно-поступательного движения позволяет создать условия для полного «залечивания» места разрыва затвердевшей оболочки заготовки или предотвращения её разрыва. Перемещение кристаллизатора может происходить по различным законам. В настоящее время режим движения кристаллизатора в основном осуществляется по синусоидальному закону. Такой режим характеризуется плавным изменением скорости движения кристаллизатора, равенством максимальных скоростей и минимальным ускорением.

Кратковременное проскальзывание кристаллизатора относительно заготовки вниз способствует залечиванию имеющихся в ней разрывов. Продолжительность этого процесса характеризуется временем опережения, которое обычно изменяется в диапазоне от 0,1 до 0,3 с.

Основными параметрами качания кристаллизатора являются частота и амплитуда. Частота характеризует количество качаний кристаллизатора в единицу времени – обычно за одну минуту. Амплитуда равна половине хода кристаллизатора между крайними точками траектории его перемещения.

Частота качания кристаллизатора зависит от скорости вытягивания заготовки

$$f = k_f \frac{w \cdot 10^3}{A}, \quad (19)$$

где  $f$  – частота качания кристаллизатора, *кач./мин*;  
 $k_f$  – коэффициент частоты качания, *кач.*;  
 $w$  – скорость вытягивания заготовки из кристаллизатора,  
*м/мин*;  
 $A$  – амплитуда качания кристаллизатора, *мм*.

На современных слябовых МНЛЗ амплитуда качания кристаллизатора равняется 3...4 мм. При этом коэффициент частоты качания кристаллизатора зависит от скорости вытягивания заготовки согласно формулы

$$k_f = -0,73w^2 + 1,44w - 0,31. \quad (20)$$

На сортовых машинах величины амплитуды качания кристаллизатора и коэффициента частоты качания зависят от размеров отливаемой заготовки, которые могут характеризоваться одной величиной – значением стороны приведённого квадрата (вычисляется как корень квадратный из площади поперечного сечения сортовой заготовки):

менее 150 мм	$A=5,5$ мм и $k_f=0,330$ кач.;
150 мм и более	$A=3,5$ мм и $k_f=0,315$ кач..

### 3.1. Задание девятое

Определить частоту качания кристаллизатора двухручье-вой криволинейной МНЛЗ при отливке заготовок сечением 240×1100 мм из стали марки 08. Скорость вытягивания заготовок из кристаллизатора изменяется в диапазоне 0,6...1,0 м/мин. Построить график зависимости частоты качания кристаллизатора от скорости вытягивания сляба.

#### Вариант выполнения девятого задания

Согласно приведённым ранее рекомендациям принимается амплитуда качания кристаллизатора слябовой МНЛЗ, равная 3 мм.

Расчёт проводится для различных значений скорости вытягивания сляба, начиная с минимального значения 0,6 м/мин, с шагом 0,1 м/мин до максимального значения 1,0 м/мин.

Для первой скорости вытягивания сляба из кристаллизатора 0,6 м/мин по формуле (20) рассчитывается значение коэффициента частоты качания кристаллизатора

$$k_{f1} = -0,73 \cdot 0,6^2 + 1,44 \cdot 0,6 - 0,31 = 0,291 \text{ кач.}$$

Частота качания определяется по формуле (19)

$$f_1 = k_{f1} \frac{w_1 \cdot 10^3}{A} = 0,291 \frac{0,6 \cdot 10^3}{3} = 58 \text{ кач./мин.}$$

Для второй скорости 0,7 м/мин

$$k_{f2} = -0,73 \cdot 0,7^2 + 1,44 \cdot 0,7 - 0,31 = 0,340 \text{ кач.}$$

$$f_2 = k_{f2} \frac{w_2 \cdot 10^3}{A} = 0,340 \frac{0,7 \cdot 10^3}{3} = 79 \text{ кач./мин.}$$

Для третьей скорости 0,8 м/мин

$$k_{f3} = -0,73 \cdot 0,8^2 + 1,44 \cdot 0,8 - 0,31 = 0,375 \text{ кач.}$$

$$f_3 = k_{f3} \frac{w_3 \cdot 10^3}{A} = 0,375 \frac{0,8 \cdot 10^3}{3} = 100 \text{ кач./мин.}$$

Для четвёртой скорости 0,9 м/мин

$$k_{f4} = -0,73 \cdot 0,9^2 + 1,44 \cdot 0,9 - 0,31 = 0,395 \text{ кач.}$$

$$f_4 = k_{f4} \frac{w_4 \cdot 10^3}{A} = 0,395 \frac{0,9 \cdot 10^3}{3} = 119 \text{ кач./мин.}$$

Для пятой скорости 1,0 м/мин

$$k_{f5} = -0,73 \cdot 1,0^2 + 1,44 \cdot 1,0 - 0,31 = 0,400 \text{ кач.}$$

$$f_5 = k_{f5} \frac{w_5 \cdot 10^3}{A} = 0,400 \frac{1,0 \cdot 10^3}{3} = 133 \text{ кач./мин.}$$

Из расчётных значений формируется табл. 3.

По данным табл. 3 строится график зависимости частоты качания кристаллизатора от скорости вытягивания слябовой заготовки, представленный на рис. 6.

Анализ рис. 6 показывает, что частота качания кристаллизатора возрастает с увеличением скорости вытягивания сляба по криволинейной зависимости.

Таблица 3

Результаты расчёта частоты качания кристаллизатора  
слябовой МНЛЗ

Скорость вытягивания слябовой заготовки, <i>м/мин</i>	Частота качания кристаллизатора, <i>кач./мин</i>
0,6	58
0,7	79
0,8	100
0,9	119
1,0	133

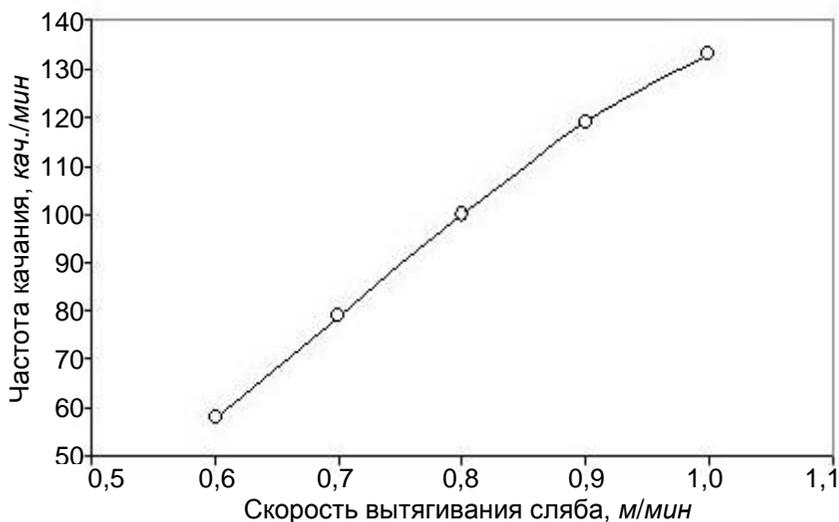


Рис. 6. Зависимость частоты качания кристаллизатора от скорости вытягивания сляба из кристаллизатора при разливке стали марки 08

### 3.2. Задание десятое

Определить частоту качания кристаллизатора шестиручье-вой радиальной МНЛЗ при отливке заготовок сечением  $140 \times 150$  мм из стали марки Ст.3сп. Скорость вытягивания заготовок из кристаллизатора изменяется в диапазоне  $1,9 \dots 3,1$  м/мин. Построить график зависимости частоты качания кристаллизатора от скорости вытягивания заготовки.

#### Вариант выполнения десятого задания

На сортовой МНЛЗ отливается заготовка с площадью поперечного сечения, равной

$$S = a \cdot b = 140 \times 150 = 21000 \text{ мм}^2.$$

Сторона приведённого квадрата заготовки будет равна

$$a_{np} = \sqrt{S} = \sqrt{21000} = 145 \text{ мм}.$$

В соответствии с рекомендациями для машин, на которых отливаются сортовые заготовки со стороной приведённого квадрата менее 150 мм, принимаются следующие значения амплитуды качания кристаллизатора и коэффициента частоты качания:

$$A = 5,5 \text{ мм} \text{ и } k_f = 0,330 \text{ кач.};$$

С использованием формулы (19) рассчитываются значения частоты качания кристаллизатора:

для первой скорости вытягивания заготовки из кристаллизатора 1,9 м/мин

$$f_1 = k_f \frac{w_1 \cdot 10^3}{A} = 0,330 \frac{1,9 \cdot 10^3}{5,5} = 114 \text{ кач./мин.}$$

Для второй скорости 2,1 м/мин

$$f_2 = k_f \frac{w_2 \cdot 10^3}{A} = 0,330 \frac{2,1 \cdot 10^3}{5,5} = 126 \text{ кач./мин.}$$

Для третьей скорости 2,3 м/мин

$$f_3 = k_f \frac{w_3 \cdot 10^3}{A} = 0,330 \frac{2,3 \cdot 10^3}{5,5} = 138 \text{ кач./мин.}$$

Для четвёртой скорости 2,5 м/мин

$$f_4 = k_f \frac{w_4 \cdot 10^3}{A} = 0,330 \frac{2,5 \cdot 10^3}{5,5} = 150 \text{ кач./мин.}$$

Для пятой скорости 2,7 м/мин

$$f_5 = k_f \frac{w_5 \cdot 10^3}{A} = 0,330 \frac{2,7 \cdot 10^3}{5,5} = 162 \text{ кач./мин.}$$

Для шестой скорости 2,9 м/мин

$$f_6 = k_f \frac{w_6 \cdot 10^3}{A} = 0,330 \frac{2,9 \cdot 10^3}{5,5} = 174 \text{ кач./мин.}$$

Для седьмой скорости 3,1 м/мин

$$f_7 = k_f \frac{w_7 \cdot 10^3}{A} = 0,330 \frac{3,1 \cdot 10^3}{5,5} = 186 \text{ кач./мин.}$$

Расчётные значения заносятся в табл. 4.

Таблица 4

Результаты расчёта частоты качания кристаллизатора  
сортовой МНЛЗ

Скорость вытягивания сортовой заготовки, м/мин	Частота качания кристаллизатора, кач./мин
1,9	114
2,1	126
2,3	138
2,5	150
2,7	162
2,9	174
3,1	186

По данным табл. 4 строится график зависимости частоты качания кристаллизатора от скорости вытягивания сортовой заготовки, приведенный на рис. 7.

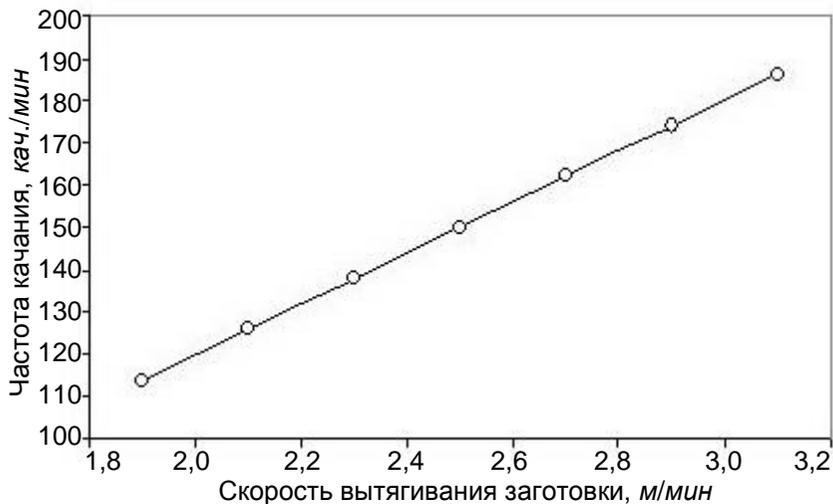


Рис. 7. Зависимость частоты качания кристаллизатора сортовой МНЛЗ от скорости вытягивания заготовки из кристаллизатора при разливке стали марки Ст.3сп

Из рис. 7 видно, что частота качания кристаллизатора возрастает с увеличением скорости вытягивания сортовой заготовки по прямолинейной зависимости.

## ГЛАВА 4. ОХЛАЖДЕНИЕ ЗАГОТОВКИ В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ

В водоохлаждаемом кристаллизаторе различного типа осуществляется первичное охлаждение заготовки.

На слябовых МНЛЗ используются сборные кристаллизаторы из четырех медных плит, каждая из которых крепится к индивидуальной стальной плите. По толщине медных плит кристаллизаторы подразделяются на тонкостенные и толстостенные. В тонкостенных кристаллизаторах плиты изготавливаются из холоднодеформированной меди толщиной 15...25 мм, а в толстостенных – из горячедеформированной меди толщиной 60...90 мм.

В тонкостенных кристаллизаторах вода подается в зазор между внешней поверхностью медных плит и стальных пластин. В толстостенных кристаллизаторах вода движется внутри просверленных в медной плите цилиндрических каналов либо в фрезерованных каналах прямоугольной формы с наружной стороны медной плиты (рис. 8).

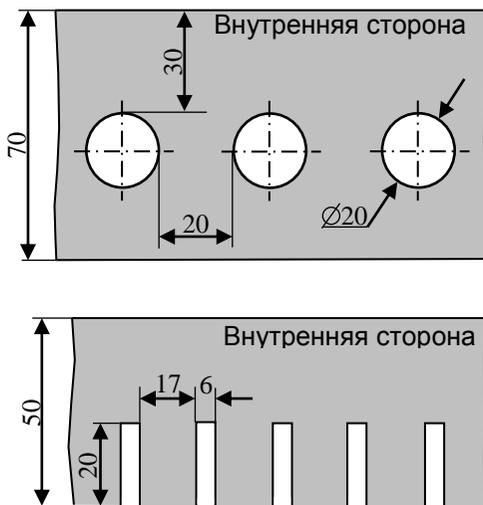


Рис. 8. Схемы фрагментов медных плит сборного толстостенного кристаллизатора с цилиндрическими (вверху) и прямоугольными (внизу) каналами охлаждения

На сортовых МНЛЗ применяются неразборные гильзовые кристаллизаторы из цельнотянутых медных труб со стенкой толщиной до 20 мм. Гильза крепится в стальном корпусе с использованием рёбер жёсткости. Охлаждающая вода движется по зазору шириной 4...7 мм между внешней поверхностью гильзы и корпусом в направлении снизу вверх.

Основным показателем, характеризующим режим первичного охлаждения заготовки в кристаллизаторе, является расход охлаждающей воды.

Расход воды на охлаждение кристаллизатора должен быть таким, чтобы обеспечивалось выполнение двух условий:

– температура воды на выходе из кристаллизатора не должна превышать 40...45 °С для предотвращения отложения солей внутри каналов;

– скорость циркуляции воды должна быть такой, чтобы не происходило образования застойных зон с локальным перегревом.

Расход воды, обеспечивающий выполнение первого условия, определяется по формуле

$$G_{кр} = \frac{3,6 Q F_{кр}}{\rho_в c_в \Delta t_в}, \quad (21)$$

где  $G_{кр}$  – расход воды на охлаждение кристаллизатора по рассматриваемому условию,  $м^3/ч$ ;

$Q$  – средняя плотность теплового потока от заготовки к кристаллизатору,  $Вт/м^2$ ;

$F_{кр}$  – площадь поверхности кристаллизатора, воспринимающая тепловой поток,  $м^2$ ;

$\rho_в$  – плотность воды,  $кг/м^3$ ;

$c_в$  – удельная теплоемкость воды,  $кДж/(кг \cdot град)$ ;

$\Delta t_в$  – перепад температуры воды в кристаллизаторе, °С.

В формуле (21) средняя плотность теплового потока от заготовки к кристаллизатору вычисляется по формуле

$$Q = \lambda \frac{\Delta t}{\xi_{50}}, \quad (22)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности затвердевшего металла,  $Вт/(м \cdot град)$ ;

$\Delta t$  – средний перепад температуры между температурой жидкого металла и температурой поверхности

заготовки, °С;

$\zeta_0$  – средняя толщина слоя затвердевшего металла в кристаллизаторе, м.

Рекомендуются следующие значения коэффициента теплопроводности затвердевшего металла:

28...33 Вт/(м·град) – для углеродистой стали;

25...30 Вт/(м·град) – для легированной стали.

Средний перепад температуры между температурой жидкого металла и температурой поверхности заготовки изменяется в диапазоне 350...400 °С.

Средняя толщина слоя затвердевшего металла в кристаллизаторе определяется по формуле

$$\xi_0 = k_3 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{H_{кр} - \Delta h}{2w}}, \quad (23)$$

где  $k_3$  – коэффициент затвердевания стали, мм/мин<sup>0,5</sup>;

$H_{кр}$  – высота кристаллизатора, м;

$\Delta h$  – величина недолива жидкого металла до верхнего края медной плиты кристаллизатора, м;

$w$  – скорость вытягивания заготовки из кристаллизатора, м/мин.

В формуле (21) площадь поверхности кристаллизатора, воспринимающая тепловой поток, рассчитывается по уравнению

$$F_{кр} = \left[ A_0 - \frac{(A_0 - A_1)}{H_{кр}} \Delta h + A_1 + B_0 - \frac{(B_0 - B_1)}{H_{кр}} \Delta h + B_1 \right] \cdot (H_{кр} - \Delta h), \quad (24)$$

где  $A_0, B_0$  – расстояние между противоположными стенками соответственно по толщине и ширине верхней части кристаллизатора, м;

$A_1, B_1$  – расстояние между противоположными стенками соответственно по толщине и ширине нижней части кристаллизатора, м.

Обычно ширина слябовой заготовки превышает заданные размеры в верхней части кристаллизатора на 2...3 %, а в нижней его части – на 1...2 %. По толщине аналогичные значения составляют соответственно 4...5 % и 3...4 %.

Ширина сортовой заготовки превышает заданные размеры в верхней части кристаллизатора, как правило, на 3...4 %, а толщина – на 3,5...4,5 %. В нижней части кристаллизатора превышение размеров по ширине и толщине практически одинаковое и составляет 1,9...2,7 %.

Удельная теплоемкость воды может быть принята равной 4,187 кДж/(кг·град).

В формуле (21) перепад температуры воды в кристаллизаторе вычисляется как разность между температурой воды на выходе из кристаллизатора (40...45 °С) и ее температурой на входе (15...25 °С).

Расход воды, обеспечивающий выполнение второго условия – заданную скорость ее движения, определяется по формуле

$$G'_{кр} = 3600 F_{охл} v_e, \quad (25)$$

где  $G'_{кр}$  – расход воды на охлаждение кристаллизатора по данному условию, м<sup>3</sup>/ч;

$F_{охл}$  – площадь поперечного сечения каналов или зазора, внутри которых циркулирует вода, м<sup>2</sup>;

$v_e$  – скорость движения воды, м/с.

Площадь поперечного сечения полости, внутри которой циркулирует вода, определяется после выбора того или иного типа кристаллизатора с соответствующей системой охлаждения. В случае выбора гильзового кристаллизатора необходимо рассчитать площадь поперечного сечения щели между гильзой и стальным корпусом. При выборе сборного кристаллизатора искомая площадь будет равна произведению количества каналов круглой или прямоугольной формы (см. рис. 8) на площадь поперечного сечения одного канала соответствующей формы. При этом количество каналов можно подсчитать по формуле

$$m = \frac{P_{cp}}{L_{кан}} + 1, \quad (26)$$

где  $m$  – количество каналов, шт.;

$P_{cp}$  – периметр кристаллизатора в средней его части по осям каналов, мм;

$L_{кан}$  – расстояние между осями соседних каналов, мм.

В формуле (26) периметр по осям каналов в средней части кристаллизатора определяется по формуле

$$P_{cp} = A_0 + A_1 + B_0 + B_1 + 8a_{пл}, \quad (27)$$

где  $a_{пл}$  – расстояние от внутренней стороны медной плиты кристаллизатора до оси каналов, мм.

В формуле (25) скорость движения воды внутри кристаллизатора изменяется в интервале 6...10 м/с.

#### 4.1. Задание одиннадцатое

Определить расход воды на охлаждение кристаллизатора двухручьевой МНЛЗ вертикального типа при отливке непрерывнолитой заготовки с размерами поперечного сечения 200×1310 мм из стали марки 09Г2С. Кристаллизатор имеет высоту 1000 мм, а заготовка вытягивается из него с максимальной скоростью 1,1 м/мин. Температура металла в промежуточном ковше составляет 1554 °С. Расход воды должен быть таким, чтобы на выходе из кристаллизатора обеспечивалась температура охлаждающей воды не более 40...45 °С.

##### Вариант выполнения одиннадцатого задания

Для получения температуры воды на выходе из кристаллизатора не более 40...45 °С расчет расхода воды ведется по формуле (21).

На основании справочных данных из марочника в стали марки 09Г2С согласно ГОСТ 17066-94 содержание химических элементов должно быть следующим:

С	Si	Mn	S	P
0,09...0,12;	0,6...0,8;	1,4...1,7;	≤0,030;	≤0,025.

Принимается, что в стали марки 09Г2С содержится

С	Si	Mn	S	P
0,11;	0,70;	1,57;	0,021;	0,019.

Тогда температура ликвидус такой стали по формуле (6) будет равна

$$t_{ликв} = 1539 - 73 \cdot 0,11 - 12 \cdot 0,70 - 3 \cdot 1,57 - 30 \cdot 0,021 - 28 \cdot 0,019 = 1517^\circ \text{C}.$$

Величина перегрева стали в промежуточном ковше согласно формулы (5) составит

$$\Delta t_{неp} = 1554 - 1517 = 37^\circ C.$$

Коэффициент затвердевания стали определяется по формуле (4)

$$k_3 = 30 - 0,2 \cdot 37 = 22,6 \text{ мм/мин}^{0,5}.$$

Принимается величина недолива жидкого металла до верхнего края медной плиты кристаллизатора, равной 100 мм. Средняя толщина слоя затвердевшего металла в кристаллизаторе определяется по формуле (23)

$$\xi_0 = 22,6 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{1,0 - 0,1}{2 \cdot 1,1}} = 0,0145 \text{ м}.$$

Для легированной стали марки 09Г2С принимается значение коэффициента теплопроводности, равное 30 Вт/(м·град) и величина перепада температуры между температурой жидкого металла и температурой поверхности заготовки, равная 400 °С.

Тогда по формуле (22) средняя плотность теплового потока от заготовки к кристаллизатору будет равна

$$Q = 30 \frac{400}{0,0145} = 827586 \text{ Вт/м}^2.$$

Согласно рекомендациям принимается, что ширина слябовой заготовки превышает заданные размеры в верхней части кристаллизатора на 2,5 %, а в нижней его части – на 1,5 %:

$$B_0 = 1,025 \cdot 1,31 = 1,343 \text{ м}; \quad B_1 = 1,015 \cdot 1,31 = 1,330 \text{ м}.$$

По толщине аналогичные значения составляют соответственно 4,5 % и 3,5 %:

$$A_0 = 1,045 \cdot 0,20 = 0,209 \text{ м}; \quad A_1 = 1,035 \cdot 0,20 = 0,207 \text{ м}.$$

Тогда по формуле (24) площадь поверхности кристаллизатора, воспринимающая тепловой поток, будет равна

$$F_{кр} = \left[ \frac{0,209 - \frac{(0,209 - 0,207)}{1,0} 0,1 + 0,207 + 1,343 -}{\frac{(1,343 - 1,330)}{1,0} 0,1 + 1,330} \right] \cdot (1,0 - 0,1) =$$

$$= 2,691 \text{ м}^2.$$

Удельная теплоемкость воды может быть принята равной  $4,187 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{град)}$ , а величина перепада температуры воды в кристаллизаторе, равной  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Расход воды определяется по формуле (21)

$$G_{\text{сп}} = \frac{3,6 \cdot 827586 \cdot 2,691}{1000 \cdot 4,187 \cdot 15} = 128 \text{ м}^3 / \text{ч}.$$

#### 4.2. Задание двенадцатое

Определить расход воды на охлаждение кристаллизатора двухручьевой МНЛЗ вертикального типа при отливке непрерывной заготовки с размерами поперечного сечения  $200 \times 1310 \text{ мм}$  из стали марки 09Г2С. Расход воды должен быть таким, чтобы обеспечивалась ее скорость движения в каналах  $6 \text{ м/с}$ .

##### Вариант выполнения двенадцатого задания

Выбирается вариант сборного толстостенного кристаллизатора с толщиной медных плит, равной  $70 \text{ мм}$ . Согласно рис. 8 расстояние от внутренней стороны медной плиты кристаллизатора до оси сверленных каналов принимается равным  $40 \text{ мм}$ , аналогичным будет и расстояние между осями соседних каналов. По формуле (27) определяется периметр по осям каналов в средней части кристаллизатора

$$P_{\text{сп}} = 209 + 207 + 1343 + 1330 + 8 \cdot 40 = 3409 \text{ мм}.$$

Количество каналов подсчитывается по формуле (26)

$$m = \frac{3409}{40} + 1 = 86 \text{ шт}.$$

Площадь поперечного сечения каналов, внутри которых циркулирует вода, составит

$$F_{охл} = \frac{\pi \cdot d_{кан}^2}{4} \cdot m = \frac{3,14 \cdot 0,02^2}{4} \cdot 86 = 0,027 \text{ м}^2.$$

Тогда по формуле (25) расход воды на кристаллизатор будет равен

$$G_{кр}^i = 3600 \cdot 0,027 \cdot 6 = 583 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Сравнив результаты расходов воды, рассчитанные в десятом и одиннадцатом заданиях по двум различным условиям, принимается наибольшее значение расхода воды на кристаллизатор – 583 м<sup>3</sup>/ч.

### 4.3. Задание тринадцатое

Определить расход воды на охлаждение кристаллизатора шестиручьевой МНЛЗ радиального типа при отливке непрерывной заготовки с размерами поперечного сечения 130×160 мм из стали марки 65Г. Кристаллизатор имеет высоту 900 мм, а заготовка вытягивается из него с максимальной скоростью 3,3 м/мин. Температура металла в промежуточном ковше составляет 1515 °С. Расход воды должен быть таким, чтобы на выходе из кристаллизатора обеспечивалась температура охлаждающей воды не более 40 °С.

#### Вариант выполнения тринадцатого задания

Для получения температуры воды на выходе из кристаллизатора не более 40 °С расчет расхода воды ведется по формуле (21).

По справочным данным из марочника в стали марки 65Г согласно ГОСТ 14959-79 содержание химических элементов должно быть следующим:

С	Si	Mn	S	P
0,62...0,70;	0,17...0,37;	0,9...1,2;	≤0,030;	≤0,025.

Принимается, что в стали марки 65Г содержится

С	Si	Mn	S	P
0,66;	0,25;	1,15;	0,022;	0,018.

Тогда температура ликвидус такой стали по формуле (6) будет равна

$$t_{\text{ликв}} = 1539 - 73 \cdot 0,66 - 12 \cdot 0,25 - 3 \cdot 1,15 - 30 \cdot 0,022 - \\ - 28 \cdot 0,018 = 1483^\circ \text{C}.$$

Величина перегрева стали в промежуточном ковше согласно формулы (5) составит

$$\Delta t_{\text{неп}} = 1515 - 1483 = 30^\circ \text{C}.$$

Коэффициент затвердевания стали определяется по формуле (4)

$$k_3 = 30 - 0,2 \cdot 30 = 24 \text{ мм/мин}^{0,5}.$$

Величина недолива жидкого металла до верхнего края медной гильзы кристаллизатора принимается равной 150 мм. Средняя толщина слоя затвердевшего металла в кристаллизаторе определяется по формуле (23)

$$\xi_0 = 24 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{0,9 - 0,15}{2 \cdot 3,3}} = 0,0081 \text{ м}.$$

Для легированной стали марки 65Г принимается значение коэффициента теплопроводности, равное 29,5 Вт/(м·град) и величина перепада температуры между температурой жидкого металла и температурой поверхности заготовки, равная 395 °С.

Тогда по формуле (22) средняя плотность теплового потока от заготовки к кристаллизатору будет равна

$$Q = 29,5 \frac{395}{0,0081} = 1438580 \text{ Вт/м}^2.$$

В соответствии с рекомендациями принимается, что ширина сортовой заготовки превышает заданные размеры в верхней части кристаллизатора на 3,5 %, а в нижней его части – на 2,2 %:

$$B_0 = 0,160 \cdot 1,035 = 0,1656 \text{ м}; \quad B_1 = 0,160 \cdot 1,022 = 0,1635 \text{ м}.$$

По толщине аналогичные значения составляют соответственно 4,0 % и 2,5 %:

$$A_0 = 0,130 \cdot 1,040 = 0,1352 \text{ м}; \quad A_1 = 0,130 \cdot 1,025 = 0,1333 \text{ м}.$$

Тогда по формуле (24) площадь поверхности кристаллизатора, воспринимающая тепловой поток, будет равна

$$F_{кр} = \left[ \frac{0,1352 - \frac{(0,1352 - 0,1327)}{0,9} \cdot 0,15 + 0,1333 + 0,1656 -}{\frac{(0,1656 - 0,1635)}{0,9} \cdot 0,15 + 0,1635} \right] \cdot (0,9 - 0,15) = 0,448 \text{ м}^2.$$

Удельная теплоемкость воды может быть принята равной  $4,187 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{град)}$ , а величина перепада температуры воды в кристаллизаторе, равной  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Расход воды определяется по формуле (21)

$$G_{кр} = \frac{3,6 \cdot 1438580 \cdot 0,448}{1000 \cdot 4,187 \cdot 15} = 37 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

#### 4.4. Задание четырнадцатое

Определить расход воды на охлаждение кристаллизатора шестиручьевой МНЛЗ радиального типа при отливке непрерывнолитой заготовки с размерами поперечного сечения  $130 \times 160 \text{ мм}$  из стали марки 65Г. Расход воды должен быть таким, чтобы обеспечивалась ее скорость движения в каналах  $7 \text{ м/с}$ .

##### Вариант выполнения четырнадцатого задания

Кристаллизатор сортовой МНЛЗ выполняется в виде цельной медной гильзы. Принимается, что стенки гильзы имеют толщину  $15 \text{ мм}$ , а ширина зазора между медной гильзой и опорными пластинами, в который подается охлаждающая вода, составляет  $4 \text{ мм}$ . Площадь поперечного сечения щели на половине высоты кристаллизатора будет рассчитываться по формуле

$$F_{охл} = (B_{ср} + 2 \cdot \delta_{гильзы} + 2 \cdot \delta_{зазора}) \cdot (A_{ср} + 2 \cdot \delta_{ильзы} + 2 \cdot \delta_{зазора}) - (B_{ср} + 2 \cdot \delta_{гильзы}) \cdot (A_{ср} + 2 \cdot \delta_{ильзы}),$$

где  $A_{cp}, B_{cp}$  – расстояние между противоположными стенками соответственно по толщине и ширине в средней части кристаллизатора, м;

$\delta_{\text{гильзы}}$  – толщина медной гильзы кристаллизатора, м;

$\delta_{\text{зазора}}$  – ширина зазора между медной гильзой и опорными пластинами корпуса кристаллизатора, м.

С учетом принятых в предыдущем задании значений превышения ширины сортовой заготовки заданных размеров: вверху кристаллизатора на 3,5 % и внизу на 2,2 % в средней его части превышение составит 2,85 %. Аналогично по толщине при исходных значениях 4,0 и 2,5 % среднее превышение будет равно 3,25 %.

Тогда расстояние между противоположными стенками по толщине и ширине в средней части кристаллизатора составит  $B_{cp} = 1,0285 \cdot 0,160 = 0,1646 \text{ м}$ ;  $A_{cp} = 1,0325 \cdot 0,130 = 0,1342 \text{ м}$ .

По вышеприведенной формуле рассчитывается искомая площадь поперечного сечения щели для подачи охлаждающей воды

$$F_{\text{охл}} = (0,1646 + 2 \cdot 0,015 + 2 \cdot 0,004) \cdot (0,1342 + 2 \cdot 0,015 + 2 \cdot 0,004) - (0,1646 + 2 \cdot 0,015) \cdot (0,1342 + 2 \cdot 0,015) = 0,00294 \text{ м}^2.$$

Тогда по формуле (25) расход воды на кристаллизатор будет равен

$$G'_{\text{кр}} = 3600 \cdot 0,00294 \cdot 7 = 74 \text{ м}^3 / \text{ч}.$$

Данная величина в два раза превышает значение расхода воды для охлаждения кристаллизатора по первому условию и может быть принята в качестве итоговой.

## ГЛАВА 5. ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ РАЗЛИВКИ МЕТАЛЛА ОДНОЙ ПЛАВКИ И ГОДОВАЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ МНЛЗ

Важным параметром непрерывной разливки стали является продолжительность разливки металла одной плавки на МНЛЗ. Величина этого параметра не должна быть слишком большой – обычно не более 90 мин, так как в противном случае чрезмерное охлаждение металла не позволит нормально осуществить процесс разливки и получить заготовки высокого качества. Продолжительность разливки металла из одного сталеразливочного ковша вычисляется по формуле

$$\tau_p = \frac{M}{N \cdot \rho_{cm} \cdot F \cdot w}, \quad (28)$$

где  $\tau_p$  – продолжительность разливки металла одной плавки, мин;

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

$N$  – количество ручьёв машины, шт.;

$\rho_{cm}$  – плотность твёрдого горячего металла заготовки, т/м<sup>3</sup>;

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

$w$  – скорость вытягивания заготовки из кристаллизатора, м/мин.

Количество отлитых мерных заготовок можно рассчитать двумя способами.

Первым способом данный параметр можно определить с использованием значений продолжительности разливки металла, скорости вытягивания заготовки из кристаллизатора и длины отливаемых заготовок по формуле

$$n = \frac{w \cdot \tau_p \cdot N}{l_{заг}}, \quad (29)$$

где  $n$  – количество отлитых мерных заготовок, шт.;

$l_{заг}$  – длина отливаемой заготовки, м.

По второму способу для вычисления используются данные о массе разливаемого металла, всех размерах заготовки и плотности металла

$$n = \frac{M}{a \cdot b \cdot l_{заг} \cdot \rho_{см}}. \quad (30)$$

Количество мерных заготовок должно составлять целую часть значения, полученного расчётным путём.

Годовая производительность МНЛЗ при работе основным методом «плавка на плавку» рассчитывается по формуле

$$P = \frac{M \cdot 1440 \cdot g_z \cdot D}{100 \left( \tau_p + \frac{\tau_n}{n_c} \right)}, \quad (31)$$

где  $P$  – годовая производительность машины, *т*;  
 $g_z$  – выход годных заготовок, %;  
 $D$  – количество рабочих суток в году, *сут.*;  
 $\tau_n$  – длительность паузы между сериями, *мин*;  
 $n_c$  – среднее количество плавков в одной серии, *пл.*

Для расчета годовой производительности МНЛЗ можно принимать следующие исходные данные:

$g_z = 96 \dots 98$  %;  $D = 300 \dots 330$  *сут.*;  
 для слябовой МНЛЗ  $\tau_n = 150 \dots 180$  *мин*;  $n_c = 10 \dots 50$  *пл.*;  
 для сортовой МНЛЗ  $\tau_n = 20 \dots 40$  *мин*;  $n_c = 10 \dots 30$  *пл.*

### 5.1. Задание пятнадцатое

Определить продолжительность разливки стали марки Ст.3сп одной плавки, количество отлитых мерных заготовок и годовую производительность четырёхручьевого МНЛЗ криволинейного типа. Разливка ведется из 350-*т* сталеразливочного ковша на слябы сечением 240×1200 мм и длиной 8 м со скоростью вытягивания 0,72 м/мин.

#### Вариант выполнения пятнадцатого задания

Продолжительность разливки стали марки Ст.3сп вычисляется с использованием формулы (28). В этой формуле неизвестную величину имеет плотность твёрдого горячего металла

слябовой заготовки. Данный параметр обычно изменяется в диапазоне 7,5...7,6 т/м<sup>3</sup>. Принимается  $\rho_{cm} = 7,5 \text{ т/м}^3$ .

Площадь поперечного сечения отливаемой заготовки равна произведению толщины сляба на его ширину, имеющих размерность в метрах.

После этого по формуле (28) определяется продолжительность разливки металла одной плавки

$$\tau_p = \frac{350}{4 \cdot 7,5 \cdot 0,24 \cdot 1,2 \cdot 0,72} = 56,3 \text{ мин.}$$

По первому способу с использованием для вычислений формулы (29) количество отлитых мерных заготовок составит

$$n = \frac{0,72 \cdot 56,3 \cdot 4}{8} = 20,3 \text{ шт.} = 20 \text{ шт.}$$

По формуле (30) второго способа расчета

$$n = \frac{M}{a \cdot b \cdot l_{заг} \cdot \rho_{cm}} = \frac{350}{0,24 \cdot 1,2 \cdot 8 \cdot 7,5} = 20,3 \text{ шт.} = 20 \text{ шт.}$$

Для расчета годовой производительности МНЛЗ принимаются значения следующих параметров:

выход годных заготовок  $g_z = 97 \%$ ;

количество рабочих суток в году  $D = 310 \text{ сут.}$ ;

длительность паузы между сериями  $\tau_n = 160 \text{ мин.}$ ;

среднее количество плавов в одной серии  $n_c = 30 \text{ пл.}$

Тогда по формуле (31) годовая производительность машины составит

$$P = \frac{350 \cdot 1440 \cdot 97 \cdot 310}{100 \left( 56,3 + \frac{160}{30} \right)} = 2459000 \text{ т.}$$

## 5.2. Задание шестнадцатое

Определить количество мерных непрерывнолитых заготовок и их общую массу по следующим исходным данным. Сталь марки 10ХСНД разливалась из 300-*т* сталеразливочного ковша на двухручьевой МНЛЗ криволинейного типа. Слябы имеют сечение 200×1380 мм и длину 8 м. Скорость вытягивания слябов из кристаллизатора составляла 0,95 м/мин. Через 57 мин машина была аварийно остановлена.

### Вариант выполнения шестнадцатого задания

Количество отлитых мерных заготовок определяется за фактическую продолжительность работы МНЛЗ в течение 57 мин с использованием формулы (29)

$$n = \frac{0,95 \cdot 57 \cdot 2}{8} = 13,5 \text{ шт.} = 13 \text{ шт.}$$

Принимается плотность твёрдого горячего металла слябовой заготовки, равная 7,6 т/м<sup>3</sup>.

Тогда общая масса отлитых заготовок будет равна

$$M_{\text{заг}} = 13 \cdot 0,2 \cdot 1,38 \cdot 8 \cdot 7,6 = 218,2 \text{ т.}$$

Она составляет около 73 % от массы металла в сталеразливочном ковше.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии рассмотрено шестнадцать вариантов выполнения заданий по расчёту параметров, характеризующих внутреннее строение непрерывнолитой заготовки: толщины слоя затвердевшего металла и скорости его затвердевания при нахождении заготовки в различных местах по технологической длине машины; протяжённости лунки жидкого металла внутри заготовки; а также основных технологических параметров процесса разливки: весовой скорости разливки стали; диаметра канала стаканов в промежуточном и сталеразливочном ковшах; частоты качания кристаллизатора МНЛЗ; максимальной скорости вытягивания заготовки из кристаллизатора; расхода воды на охлаждение кристаллизатора; продолжительности полного затвердевания непрерывнолитой заготовки; продолжительности разливки металла одной плавки и годовой производительности МНЛЗ.

В двух приложениях пособия представлена краткая техническая характеристика пяти вариантов слябовых и трёх вариантов сортовых МНЛЗ, которые в качестве исходных данных могут быть использованы при проведении расчётов технологических параметров непрерывной разливки стали.

## РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Еланский Г.Н. Разливка и кристаллизация стали: Учебное пособие для вузов. – М.: МГВМИ, 2010. – 192 с.
2. Кудрин В.А. Теория и технология производства стали – М.: Мир, 2003. – 528 с.
3. Разливка стали / В.И. Баптизманский, Е.И. Исаев, В.С. Коновалов и др. Киев – Донецк: гол. изд. ИО “Вицца школа”, 1977. – 200 с.
4. Непрерывная разливка стали на радиальных установках / В.Т. Сладкоштеев, Р.В. Потанин, О.Н. Суладзе, В.С. Рутес – М.: Metallurgia, 1974. – 288 с.
5. Непрерывная разливка стали в сортовые заготовки / В.С. Рутес, Н.Н. Гуглин, Д.П. Евтеев и др. – М.: Metallurgia, 1967. – 144 с.
6. Попандопуло И.К., Михневич Ю.Ф. Непрерывная разливка стали – М.: Metallurgia, 1990. – 296 с.
7. Лякишев Н.П., Шалимов А.Г. Развитие технологии непрерывной разливки стали – М.: ЭЛИЗ, 2002. – 208 с.
8. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В. Современная технология производства стали. – М.: Теплотехник. – 2007. – 528 с.
9. Столяров А.М., Селиванов В.Н. Непрерывная разливка стали. Часть первая. Конструкция и оборудование МНЛЗ: Учебное пособие. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. – 154 с.
10. Столяров А.М., Селиванов В.Н. Технология непрерывной разливки стали: Учебное пособие. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. – 78 с.

Приложение А

Характеристика слябовых МНЛЗ

Таблица П.А.1

Техническая характеристика комбинированных слябовых  
МНЛЗ №1 и №4 кислородно-конвертерного цеха  
ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»

Параметр	Размерность	Значение
Тип машины		Криволинейная
Количество ручьев	<i>шт.</i>	2, 4
Базовый радиус машины	<i>мм</i>	8000
Металлургическая длина машины	<i>мм</i>	35800
Вместимость сталеразливочного ковша	<i>т</i>	370
Размеры слябов: толщина ширина – четыре ручья – два ручья длина	<i>мм</i>	250  750...1050 1100...2520 4800...12000
Высота радиального кристаллизатора	<i>мм</i>	1200
Количество зон вторичного охлаждения заготовки	<i>шт.</i>	6

Окончание табл. П.А.1

Параметр	Размерность	Значение
Длина зон вторичного охлаждения заготовки по стороне базового радиуса (вид охладителя):		
первая (вода)	<i>мм</i>	150
вторая (вода)		720
третья (вода-воздух)		1290
четвертая (вода-воздух)		2560
пятая (вода-воздух)		2900
шестая (вода-воздух)		3900

Таблица П.А.2

Техническая характеристика слябовых  
МНЛЗ №2 и №3 кислородно-конвертерного цеха  
ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»

Параметр	Размерность	Значение
Тип машины		Криволинейная
Количество ручьев	<i>шт.</i>	4
Базовый радиус машины	<i>мм</i>	8000
Металлургическая длина машины	<i>мм</i>	28000
Вместимость сталеразливочного ковша	<i>т</i>	370
Размеры слябов: толщина ширина длина	<i>мм</i>	250 1250...1350 4800...12000
Высота радиального кристаллизатора	<i>мм</i>	950
Количество зон вторичного охлаждения заготовки	<i>шт.</i>	7

Окончание табл. П.А.2

Параметр	Размерность	Значение
Длина зон вторичного охлаждения заготовки по стороне базового радиуса (вид охладителя):		
первая (вода)	<i>мм</i>	281
вторая (вода)		900
третья (вода-воздух)		1146
четвертая (вода-воздух)		3042
пятая (вода-воздух)		3841
шестая (вода-воздух)		3972
седьмая (вода-воздух)		4680

Таблица П.А.3

Техническая характеристика слябовой  
МНЛЗ №5 электросталеплавильного цеха  
ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»

Параметр	Размерность	Значение
Тип машины		Криволинейная с вертикальным участком
Количество ручьев	<i>шт.</i>	2
Базовый радиус машины	<i>мм</i>	8000
Металлургическая длина машины	<i>мм</i>	31685
Вместимость сталеразливочного ковша	<i>т</i>	180
Размеры слябов: толщина ширина длина	<i>мм</i>	250 1250...2350 4800...12000
Высота вертикального кристаллизатора	<i>мм</i>	900
Количество зон вторичного охлаждения заготовки	<i>шт.</i>	8

Окончание табл. П.А.3

Параметр	Размерность	Значение
Длина зон вторичного охлаждения заготовки по стороне базового радиуса (вид охладителя):		
первая (вода)		295
вторая (вода-воздух)	<i>мм</i>	760
третья (вода-воздух)		1560
четвертая (вода-воздух)		1794
пятая (вода-воздух)		1420
шестая (вода-воздух)		2899
седьмая (вода-воздух)		2556
восьмая (вода-воздух)		3121

Таблица П.А.4

Техническая характеристика слябовой  
МНЛЗ №6 кислородно-конвертерного цеха  
ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»

Параметр	Размерность	Значение
Тип машины		Криволинейная с вертикальным участком
Количество ручьев	<i>шт.</i>	1
Базовый радиус машины	<i>мм</i>	11000
Металлургическая длина машины	<i>мм</i>	34200
Вместимость сталеразливочного ковша	<i>т</i>	370
Размеры слябов: толщина ширина длина	<i>мм</i>	190, 250, 300 1400...2700 4100...12000
Высота вертикального кристаллизатора	<i>мм</i>	900
Количество зон вторичного охлаждения заготовки	<i>шт.</i>	15

Окончание табл. П.А.4

Параметр	Размерность	Значение
Длина зон вторичного охлаждения заготовки по стороне базового радиуса (вода-воздух):		
первая		1280
вторая		2130
третья		2005
четвертая		2006
пятая		2006
шестая	<i>мм</i>	2252
седьмая		2272
восьмая		2272
девятая		2272
десятая		2480
одиннадцатая		2485
двенадцатая		2485
тринадцатая		2485
четырнадцатая		2485
пятнадцатая		2485

Таблица П.А.5

Техническая характеристика слябовой МНЛЗ  
ОАО «Ашинский металлургический завод»

Параметр	Размерность	Значение
Тип машины		Криволинейная с вертикальным участком
Количество ручьев	<i>шт.</i>	1
Базовый радиус машины	<i>мм</i>	8000
Металлургическая длина машины	<i>мм</i>	25870
Вместимость сталеразливочного ковша	<i>т</i>	110
Размеры слябов: толщина ширина длина	<i>мм</i>	180, 240 900...1600 4500...6800
Высота вертикального кристаллизатора	<i>мм</i>	900
Количество зон вторичного охлаждения заготовки	<i>шт.</i>	8

Окончание табл. П.А.5

Параметр	Размерность	Значение
Длина зон вторичного охлаждения заготовки по стороне базового радиуса (вид охладителя):		
первая (вода)		240
вторая (вода-воздух)	<i>мм</i>	1295
третья (вода-воздух)		2122
четвертая (вода-воздух)		1947
пятая (вода-воздух)		3908
шестая (вода-воздух)		3919
седьмая (вода-воздух)		4762
восьмая (вода-воздух)		6800

Техническая характеристика сортовых МНЛЗ №1 и №2  
электросталеплавильного цеха

ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»

Параметр	Размерность	Значение
Тип машины		Радиальная
Количество ручьев	<i>шт.</i>	5
Базовый радиус машины	<i>мм</i>	9000
Вместимость сталеразливочного ковша	<i>т</i>	180
Размеры заготовок: поперечное сечение  длина	<i>мм</i>	124×124, 120×150, 150×150, 152×170 3500...12000
Высота радиального кристаллизатора	<i>мм</i>	900
Количество зон вторичного охлаждения заготовки	<i>шт.</i>	4
Длина зон вторичного охлаждения заготовки по стороне базового радиуса (вид охладителя): первая (вода) вторая (вода-воздух) третья (вода-воздух) четвертая (вода-воздух)	<i>мм</i>	340 2360 3460 3610

Таблица П.В.2

Техническая характеристика сортовой МНЛЗ  
электросталеплавильного цеха ОАО «Северсталь»

Параметр	Размерность	Значение
Тип машины		Радиальная
Количество ручьев	<i>шт.</i>	6
Базовый радиус машины	<i>мм</i>	10000
Вместимость сталеразливочного ковша	<i>т</i>	120
Размеры поперечного сечения заготовки	<i>мм</i>	100×100, 125×125, 150×150
Высота радиального кристаллизатора	<i>мм</i>	1000
Количество зон вторичного охлаждения заготовки	<i>шт.</i>	4
Длина зон вторичного охлаждения заготовки по стороне базового радиуса (вид охладителя): первая (вода) вторая (вода) третья (вода) четвертая (вода)	<i>мм</i>	350 2600 3800 3970

Таблица П.В.3

Техническая характеристика сортовой МНЛЗ  
фирмы «SMS» (Германия)

Параметр	Размерность	Значение
Тип машины		Радиальная
Количество ручьев	<i>шт.</i>	6
Базовый радиус машины	<i>мм</i>	7000
Вместимость сталеразливочного ковша	<i>т</i>	120
Размеры поперечного сечения заготовки	<i>мм</i>	100×100, 122×125, 150×150
Высота радиального кристаллизатора	<i>мм</i>	900
Количество зон вторичного охлаждения заготовки	<i>шт.</i>	4
Длина зон вторичного охлаждения заготовки по стороне базового радиуса (вид охладителя): первая (вода) вторая (вода) третья (вода) четвертая (вода)	<i>мм</i>	260 1850 2680 2800

Учебное текстовое электронное издание

**Столяров Александр Михайлович  
Селиванов Валентин Николаевич**

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ  
ПО НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКЕ  
СТАЛИ**

Учебное пособие

0,97 Мб

1 электрон. опт. диск

г. Магнитогорск, 2015 год

ФГБОУ ВПО «МГТУ»

Адрес: 455000, Россия, Челябинская область, г. Магнитогорск,  
пр. Ленина 38

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный  
технический университет им. Г.И. Носова»  
Кафедра металлургии черных металлов  
Центр электронных образовательных ресурсов и  
дистанционных образовательных технологий  
e-mail: ceor\_dot@mail.ru