

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

НОВОТРОИЦКИЙ ФИЛИАЛ

Кафедра металлургических технологий

А.Н. Шаповалов

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ

Методические указания для выполнения
курсовой работы по дисциплине
«Разливка стали и специальная металлургия»
для студентов, обучающихся по направлению
подготовки бакалавров 150400 «Металлургия»,
профиль «Металлургия черных металлов»,
всех форм обучения

Новотроицк – 2013

УДК 669.18
ББК 34.327
Ш 24

Рецензенты:

Главный инженер ЗАО «Механоремонтный комплекс», к.т.н. Коток А.П.

Доцент кафедры электрометаллургии и литейного производства ФГБОУ «МГТУ»,
к.т.н. Потапов М.Г.

Шаповалов А.Н. Расчет параметров непрерывной разливки стали: Методические указания для выполнения курсовой работы по дисциплине «Разливка стали и специальная металлургия» для студентов направления 150400 «Металлургия». – Новотроицк, НФ НИТУ «МИСиС», 2013. – 56с.

Методические указания для выполнения курсовой работы по дисциплине «Разливка стали и специальная металлургия» предназначено для практического закрепления теоретических знаний студентами на начальном этапе обучения по направлению 150400 «Металлургия».

Рассмотрена методика расчета основных технологических параметров непрерывной разливки стали и требуемого количества МНЛЗ в цехе. Приведены требования к оформлению пояснительной записки по курсовой работе и варианты заданий.

Рекомендовано Методическим советом НФ НИТУ «МИСиС»

© Национальный исследовательский
технологический университет
«МИСиС», 2013

Содержание

Введение	4
1 Выбор вида и типоразмера МНЛЗ.....	5
2 Параметры жидкого металла	6
3 Продолжительность затвердевания НЛЗ	8
4 Скорость вытягивания заготовки	9
5 Параметры качания кристаллизатора	14
6 Скорость разлива и диаметр каналов сталеразливочных стаканов.....	15
7 Параметры настройки кристаллизатора и системы вторичного охлаждения.....	17
8 Охлаждение кристаллизатора.....	20
9 Вторичное охлаждение заготовки.....	23
10 Длительность разлива плавки и производительность МНЛЗ.....	29
11 Определение требуемого числа МНЛЗ.....	32
12 Пример расчета параметров непрерывной разлива	33
13 Оформление пояснительной записки.....	48
Библиографический список.....	49
Приложение А Варианты заданий на курсовую работу	50
Приложение Б Краткая характеристика МНЛЗ некоторых заводов	51
Приложение В Технические характеристики МНЛЗ ОАО «Уральская сталь».....	52
Приложение Г Технологические параметры работы МНЛЗ	54
Приложение Д Характеристики кристаллизаторов МНЛЗ.....	55

Введение

Непрерывная разливка является в настоящее время основным способом разливки стали, при которой получают слябовые и сортовые заготовки. Качество непрерывнолитых заготовок (НЛЗ) во многом зависит от правильности выбора технологических параметров процесса разливки, который должен быть сделан с учетом типа машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), размеров поперечного сечения заготовки, марки стали. Экспериментальное определение рациональных параметров разливки с учетом вышеперечисленных факторов – это сложный, дорогой, трудоемкий и длительный процесс. Современное состояние теории непрерывной разливки стали позволяет определить основные технологические параметры расчетным путем. Расчет параметров непрерывной разливки стали всегда делается для конкретной МНЛЗ с учетом марочного и размерного сортамента разливаемых сталей. К параметрам МНЛЗ относятся: необходимое количество установок в цехе, их производительность, количество ручьев на каждой установке, максимально допустимая скорость вытягивания слитка, время разливки плавки и другие.

Исходными для расчета данными являются: параметры цеха, слитка и разливаемого металла, металлургическая длина машины, высота кристаллизатора, количество и длина участков вторичного охлаждения, способ вторичного охлаждения на каждом участке.

В указаниях содержатся рекомендации по расчету основных технических и технологических параметров непрерывной разливки стали. До проведения расчета необходимо проработать по литературным источникам [1-6] следующие теоретические вопросы: конструкция МНЛЗ и устройство основных её узлов, технология непрерывной разливки стали, затвердевание НЛЗ, строение и дефекты НЛЗ.

В задании на выполнение расчета указываются следующие сведения:

- сортament и годовое производство выплавляемой стали;
- конструктивные параметры МНЛЗ или источник информации для их выбора;
- сечения получаемых заготовок и объем их производства;
- масса плавки (или вместимость сталеразливочного ковша).

Все необходимые для расчета данные содержатся в приложениях А, Б и В.

Вариант задания (приложение А) и конструктивные параметры МНЛЗ (приложения Б, В) указывает преподаватель.

В курсовой работе должны быть определены:

- выбор вида, конструктивной разновидности и типоразмера МНЛЗ;
- параметры жидкого металла (допустимое содержание вредных примесей и температура металла при разливке);
- продолжительность затвердевания заготовки;
- рабочая скорость вытягивания заготовки и диапазон допустимых скоростей вытягивания;
- скорость разливки металла и диаметр каналов стаканов в сталеразливочном и промежуточном ковшах;
- параметры настройки кристаллизатора и зоны вторичного охлаждения;

- режим охлаждения кристаллизатора;
- режим вторичного охлаждения заготовки;
- длительность разливки плавки и производительность МНЛЗ;
- необходимое количество МНЛЗ.

1 Выбор вида и типоразмера МНЛЗ

В зависимости от характера литой заготовки машины для разливки стали подразделяются на два вида:

- слябовые – для получения заготовки прямоугольного сечения (слябов) и используемой на производство листового проката и ленты;
- сортовые – для получения квадрата (блужков) или близкого к нему сечения заготовки и используемой на производство сортового проката.

По конструкции МНЛЗ подразделяются на вертикальные и криволинейные. Наибольшее распространение в цехах большой мощности получили криволинейные, к достоинству которых относится высокая единичная мощность и сравнительно небольшая высота установок и здания для их размещения. МНЛЗ вертикального типа применяются лишь в случаях отливки [7, 8]:

- полых трубных заготовок и трубных заготовок большого диаметра, разливки автоматной стали и любой другой, склонной к трещинообразованию;
- заготовок из высоколегированной и электродной стали (ГОСТ 5632-6).

В зависимости от характера выполнения криволинейной зоны, МНЛЗ подразделяются на радиальные (кристаллизатор и криволинейная зона выполнены под одним радиусом) и овальные (под 3 – 4 радиусами, которые постепенно увеличиваются). Последние имеют меньшую высоту и самую высокую производительность. Они легко вписываются в существующие здания сталеплавильных цехов при замене обычной разливки непрерывной. Для получения сортовой заготовки, а также повышенном требовании к качеству, предпочтение следует отдавать криволинейным и радиальным МНЛЗ.

Прочие конструктивные разновидности МНЛЗ (вертикальные с изгибом затвердевшей заготовки, криволинейные с прямолинейной зоной первичного охлаждения и др.) выбираются по литературным источникам в зависимости от условий проектирования и решаемых задач.

Количество ручьев (одновременно отливаемых заготовок) на существующих МНЛЗ колеблется от 1 до 8 [7, 8]:

- слябовые МНЛЗ – 1 и 2-х ручьевые;
- сортовые (криволинейные) – 2, 4 и 6-и ручьевые;
- сортовые (вертикальные) – 2, 4, 6 и 8-и ручьевые.

К установке необходимо принимать МНЛЗ с минимально возможным числом ручьев. Они проще в эксплуатации и по конструкции, меньше занимают в цехе места и надежней в работе. Выход годной литой заготовки на них выше. Многоручьевые машины следует принимать лишь в случаях, когда длительность разливки на одно или двухручьевых превышает допустимые значения. В современных конвертерных цехах большой мощности обычно используются для

получения литых слябов двухручьевые и сортовой заготовки четырех и, реже, шестиручьевые машины. В электросталеплавильных цехах или при разливке относительно небольшого объема металла применяются одноручьевые. Выбор машины с тем или иным количеством ручьев уточняются в процессе расчета.

2 Параметры жидкого металла

Действующие стандарты, определяющие требования к химическому составу металла, допускают довольно высокое содержание вредных примесей – серы и фосфора (обычно до 0,040 – 0,050 %). Непрерывная разливка металла с повышенным содержанием вредных примесей сопряжена с рядом трудностей. Так, например, повышенное содержание серы требует снижения скорости разливки. В противном случае НЛЗ оказываются пораженными различными дефектами (чаще всего поверхностными и внутренними трещинами). Кроме того, при разливке такого металла возможно возникновение аварийных ситуаций, связанных с прорывами затвердевшей корки.

Обычно верхний предел содержания серы и фосфора в стали, разливаемой на МНЛЗ, устанавливается в интервале от 0,015 до 0,025 %. Выбор конкретного значения предельного содержания вредных примесей определяется возможностями технологии выплавки и ковшевой обработки металла в сталеплавильном цехе. С учетом приведенной выше информации необходимо принять предельные значения допустимых содержаний серы и фосфора в металле.

Температура разливаемого металла оказывает существенное влияние, как на технологию непрерывной разливки, так и на качество получаемой заготовки. Наилучшие результаты получаются в том случае, когда металл в промежуточном и сталеразливочном ковшах имеет оптимальный перегрев над температурой ликвидус, поэтому температура стали в промежуточном и сталеразливочном ковшах определяется по формулам:

$$\begin{aligned} t_{\text{пр.к}} &= t_{\text{ликв}} + \Delta t_{\text{пр.к}}; \\ t_{\text{ст.к}} &= t_{\text{пр.к}} + \Delta t_{\text{ст.к}}. \end{aligned} \quad (1)$$

где $t_{\text{пр.к}}$ – температура металла в промежуточном ковше, °С;
 $t_{\text{ст.к}}$ – температура металла в сталеразливочном ковше, °С;
 $t_{\text{ликв}}$ – температура ликвидус, °С;
 $\Delta t_{\text{пр.к}}$ – перегрев металла в промежуточном ковше над $t_{\text{ликв}}$, °С;
 $\Delta t_{\text{ст.к}}$ – перегрев металла в сталеразливочном ковше над $t_{\text{пр.к}}$, °С

Температуру ликвидус стали рекомендуется определять в зависимости от ее химического состава по формуле

$$t_{\text{ликв}} = 1539 - \sum_{i=1}^n [E]_i \cdot \Delta t_{E_i}^{\text{ЛИКВ}}, \quad (2)$$

где 1539 – температура затвердевания чистого железа, °С;

$[E]_i$ – среднее содержание растворенного элемента в стали, %;

$\Delta t_{E_i}^{\text{ликв}}$ – величина снижения температуры затвердевания железа при введении в него 1 % соответствующего элемента, °С.

Состав стали принимается из справочной литературы по заданной марке стали. Данные о влиянии некоторых легирующих на температуру плавления стали ($\Delta t_{E_i}^{\text{ликв}}$) представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Снижение температуры ликвидус ($\Delta t_{E_i}^{\text{ликв}}$) при введении в сталь 1 % элементов [9]

Элемент E_i	$\Delta t_{E_i}^{\text{ликв}}$, °С	Элемент E_i	$\Delta t_{E_i}^{\text{ликв}}$, °С
Углерод	73	Хром	1
Кислород	65	Молибден	3
Сера	30	Вольфрам	1
Кремний	12	Алюминий	3
Марганец	3	Ванадий	2
Фосфор	28	Титан	18
Медь	7	Кобальт	1,8
Никель	3,5		

Перегрев металла над температурой ликвидус в промежуточном ковше ($\Delta t_{\text{пр.к}}$) определяется в основном продолжительностью разливки плавки и способом подачи металла в кристаллизатор. В зависимости от условий разливки величина оптимального перегрева изменяется от 15 – 25 °С при разливке плавки закрытой струей в течение до одного часа, до 30 – 40 °С при разливке плавки открытой струей в течение более одного часа. В большинстве случаев на современных МНЛЗ применяется подача металла в кристаллизатор закрытой струей, а продолжительность разливки плавки не превышает 60 минут, поэтому оптимальный перегрев металла над температурой ликвидус в промежуточном ковше следует выбирать из диапазона 15 – 30 °С

Температура металла в сталеразливочном ковше должна быть минимальной, но обеспечивать заданный температурный уровень металла в промковше на протяжении разливки всей плавки с учетом теплотерь. Оптимальный перегрев металла в сталеразливочном ковше над температурой в промковше ($t_{\text{ст.к}}$) составляет 40 – 50 °С, поэтому, обычно, температура металла в сталеразливочном ковше на 70 – 80 °С превышает температуру ликвидус стали.

Пользуясь формулами (1) и (2), необходимо определить допустимое значение температуры в промежуточном и сталеразливочном ковшах для заданной марки стали.

3 Продолжительность затвердевания НЛЗ

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

$$\tau_3 = K_{\phi} \cdot \left(\frac{a}{2 \cdot k} \right)^2, \quad (3)$$

где **a** – толщина заготовки, мм;

τ_3 – продолжительность затвердевания, мин;

K_{ϕ} – коэффициент формы поперечного сечения заготовки;

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

Численное значение коэффициента формы K_{ϕ} принимается следующим образом:

$$K_{\phi} = 1, \text{ если } b/a \geq 2;$$

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

Величину коэффициента затвердевания **k** рекомендуется принимать в пределах 24 – 28 мм/мин^{1/2} для всех марок спокойной стали (с увеличением величины перегрева металла в промежуточном ковше коэффициент затвердевания уменьшается: от 27 – 28 мм/мин^{1/2} при перегреве $\Delta t_{\text{пр.к}} = 15 - 20$ °С, до 24 – 25 мм/мин^{1/2} при перегреве $\Delta t_{\text{пр.к}} = 30 - 40$ °С).

4 Скорость вытягивания заготовки

Установление скоростного режима заключается в определении диапазона допустимых скоростей вытягивания заготовки и рабочей скорости вытягивания.

Рабочая скорость вытягивания НЛЗ определяется индивидуально для каждой МНЛЗ, сечения заготовки и марки разливаемой стали, что связано с особенностями кристаллизации различных марок сталей (например, склонность к образованию трещин) и особенностями формирования поверхности слитка. В приложении Г представлены значения рабочих скоростей вытягивания заготовок различных сечений и марок сталей.

В качестве рабочей принимается такая скорость вытягивания, при которой обеспечивается сочетание высокого качества заготовки с достаточно высокой производительностью МНЛЗ. Обычно рабочая скорость вытягивания назначается с учетом многих факторов: марки стали, размеров поперечного сечения отливаемой заготовки, температуры металла в промежуточном коше, содержания в стали вредных примесей и др. Если температура разливаемого металла и содержание вредных примесей в ней соответствуют требованиям раздела 2, то рабочая скорость вытягивания может быть рассчитана по формуле [7, 11]

$$v_p = k_v \cdot \frac{a + b}{a \cdot b}, \quad (4)$$

где v_p – рабочая скорость вытягивания заготовки, м/мин;

k_v – коэффициент скорости вытягивания, м²/мин;

a, b – толщина и ширина заготовки, м.

Слябовая, блюмовая и сортовая заготовка отличаются друг от друга размерами одной из сторон и соотношением ширины к толщине b/a :

- для слябовой заготовки размер одной из сторон более 0,6 м, а отношение ширины к толщине заготовки более 2;
- для блюмовой заготовки размеры поперечного сечения составляют 0,2 – 0,6 м, а отношение $a/b < 2$;
- для сортовой заготовки размеры поперечного сечения не превышают 0,2 м.

Значения коэффициента скорости вытягивания k_v для слябовых заготовок приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения коэффициента скорости вытягивания k_v для слябовой заготовки [7, 11]

Марка стали, назначение		k_v
1	Углеродистая обыкновенного качества и низкоуглеродистая стабилизированная алюминием для холоднокатаного листа	0,3
2	Углеродистая и низколегированная конструкционная; углеродистая и низколегированная для судостроения, мостостроения и трубная	0,24
3	Кипящая обыкновенного качества для горячекатаного листа и сталь углеродистая конструкционная кипящая общего назначения и для холоднокатаного листа	0,24
4	Легированная и конструкционная	0,20
5	Низкоуглеродистая электротехническая динамная и трансформаторная сталь	0,18

Практика показала, что на используемых в настоящее время слябовых МНЛЗ для обеспечения получения качественной литой заготовки и безаварийной работы, скорость вытягивания (в случае получения чрезмерно высоких значений) должна ограничиваться предельными значениями, указанными в таблице 3.

Таблица 3 – Предельные значения скорости вытягивания слябовой заготовки [10]

Толщина сляба, мм	v_p , м/мин
150	1,6
200	1,6
250	1,4
300	1,2

Примечание:

1. Для случая реконструкции существующей МНЛЗ необходимо при обосновании скорости вытягивания учитывать конкретные условия разливки в цехе.
2. При получении расчётом более высоких значений скорости вытягивания, требуется соответствующее обоснование.

Значения коэффициента скорости вытягивания k_v для блюмовых заготовок (толщиной более 200 мм) приведены в таблице 4.

Значения коэффициента скорости вытягивания k_v для сортовых заготовок (толщиной менее 200 мм) находится в пределах 0,2 – 0,3. Чем более легированная сталь, тем значение коэффициента меньше.

Так как нормативных значений, ограничивающих скорость вытягивания блюмовых и сортовых заготовок нет, то она принимается равной расчетной.

Таблица 4 – Значения коэффициента скорости вытягивания k_v для блюмовых заготовок [7, 11]

Марка стали, назначение		k_v
1	Сталь углеродистая обыкновенного качества	0,14
2	Сталь углеродистая и низколегированная конструкционная; для судостроения, котлостроения, мостостроения и трубная	0,13
3	Сталь углеродистая конструкционная кипящая	0,11
4	Сталь легированная и конструкционная. Сталь высоколегированная и сплавы для электродов	0,11
5	Сталь инструментальная углеродистая, легированная и ШХ	0,10

Рабочая скорость вытягивания заготовки является базовой для определения диапазона допустимых скоростей вытягивания:

$$\begin{aligned} v_{\text{мин}} &= 0,5 \cdot v_p, \\ v_{\text{макс}} &= 1,5 \cdot v_p. \end{aligned} \quad (5)$$

Максимально допустимая скорость вытягивания заготовки ($v_{\text{макс}}$) является основанием для расчета параметров качания и охлаждения кристаллизатора. Ее значение должно обеспечивать формирование минимально допустимой толщины корочки металла на выходе из кристаллизатора ($\xi_{\text{мин}}$), которая составляет 0,01 – 0,02 м (большие значения толщин корочки металла соответствуют большему сечению заготовки). Поэтому, определив максимальную скорость вытягивания по уравнению (5) необходимо проверить ее приемлемость с точки зрения обеспечения корочки достаточной толщины. Для этого необходимо рассчитать толщину затвердевшей корочки металла на выходе из кристаллизатора из выражения

$$\xi_{\text{кр}} = k \cdot \sqrt{\frac{\tau_{\text{кр}}}{K_{\phi}}}, \quad (6)$$

где $\xi_{\text{кр}}$ – толщина корочки металла на выходе из кристаллизатора, мм;
 $\tau_{\text{кр}}$ – продолжительность затвердевания заготовки в кристаллизаторе, мин;
 K_{ϕ} – коэффициент формы поперечного сечения заготовки (см. раздел 3);
 k – коэффициент затвердевания, который для спокойной стали в зависимости от ее состава и условия затвердевания изменяется в пределах 24 – 28 мм/мин^{1/2} (см. раздел 3).

Продолжительность пребывания НЛЗ в кристаллизаторе ($\tau_{\text{кр}}$) можно определить из выражения

$$\tau_{\text{кр}} = \frac{h_{\text{кр}}}{v_{\text{макс}}}, \quad (7)$$

где $h_{кр}$ – рабочая (активная) высота кристаллизатора, то есть уровень металла в кристаллизаторе с учетом недолива, м;

$v_{макс}$ – максимальная скорость вытягивания НЛЗ, м/мин.

Рабочая высота кристаллизатора определяется длиной кристаллизатора и величиной недолива жидкого металла до верхнего края медной гильзы кристаллизатора

$$h_{кр} = H_{кр} - h_{недолив}, \quad (8)$$

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

$h_{недолив}$ – величина недолива жидкого металла до верхнего края медной гильзы кристаллизатора, м

Длина (высота) кристаллизатора зависит от сечения разливаемых слитков и в общем случае может изменяться от 300 до 1200 мм. Практический опыт эксплуатации современных МНЛЗ показал, что надежная работа машины при удовлетворительном качестве слитков может обеспечиваться кристаллизатором длиной 800 – 1000 мм.

Недолив металла в кристаллизатор обеспечивает безаварийную работу, а также позволяет проводить разливку под шлакообразующими смесями. В зависимости от организационно-технических возможностей его поддерживают на уровне 0,05 – 0,15 м.

В случае если полученная толщина корочки на выходе из кристаллизатора ($\xi_{кр}$) меньше минимально допустимой толщины ($\xi_{мин} = 0,01 - 0,02$ м), необходимо ограничить максимальную скорость вытягивания до значений, обеспечивающих формирование корочки, исключая возникновения аварийных прорывов жидкого металла.

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

$$L_{ж} = \tau_3 \cdot v. \quad (9)$$

Для определения максимальной протяженности жидкой фазы на МНЛЗ существует уточненная формула [10]:

$$L'_{ж} = K \cdot a^2 \cdot v_{макс}, \quad (10)$$

где K – коэффициент, зависящий от отношения ширины заготовки к толщине;

a – толщина наиболее толстой заготовки, отливаемой на машине, м.

Значения коэффициента K приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Значение коэффициента К для расчета протяженности жидкой фазы

Отношение b/a	Профиль заготовки	К	Отношение b/a	Профиль слитка	К
1,0	блюм	240	3,6	сляб	327
1,1	блюм	245	3,7	сляб	328
1,2	блюм	250	3,8	сляб	329
1,3	блюм	255	3,9	сляб	330
1,4	блюм	260	4	сляб	332
1,5	блюм	265	4,1	сляб	333
1,6	блюм	270	4,2	сляб	333
1,7	блюм	275	4,3	сляб	334
1,8	блюм	280	4,4	сляб	334
1,9	блюм	285	4,5	сляб	335
2,0	сляб	290	4,6	сляб	335
2,1	сляб	293	4,7	сляб	336
2,2	сляб	296	4,8	сляб	336
2,3	сляб	299	4,9	сляб	337
2,4	сляб	302	5	сляб	337
2,5	сляб	305	5,1	сляб	337
2,6	сляб	308	5,2	сляб	338
2,7	сляб	311	5,3	сляб	338
2,8	сляб	314	5,4	сляб	338
2,9	сляб	317	5,5	сляб	339
3,0	сляб	320	5,6	сляб	339
3,1	сляб	321	5,7	сляб	339
3,2	сляб	322	5,8	сляб	339
3,3	сляб	323	5,9	сляб	340
3,4	сляб	324	6 и более	сляб	340
3,5	сляб	326			

Обязательным условием получения плотной осевой зоны НЛЗ является соблюдение соотношения

$$\frac{L'_{ж}}{L_{м}} \leq 0,9, \quad (11)$$

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

Поэтому необходима проверка соблюдения условия (11) при разливке с максимальной скоростью вытягивания. Если данное условие не соблюдается, то максимальную скорость вытягивания необходимо соответственно уменьшить.

5 Параметры качания кристаллизатора

Зная максимальную скорость вытягивания слитка, можно определить параметры качания кристаллизатора, к которым относятся амплитуда и частота качания. Необходимость качания кристаллизатора вызвана тем, что в процессе непрерывной разливки корочка затвердевающего в кристаллизаторе слитка по мере его движения вниз претерпевает усадку и отходит от стенок. Зона плотного контакта корочки со стенками очень мала и находится в верхней части кристаллизатора, вблизи мениска жидкого металла. При определенных условиях в этой зоне происходит прилипание тонкой корочки к стенкам кристаллизатора. Это может привести к разрыву корочки в местах ее отхода от стенок. Если кристаллизатор неподвижен, а слиток вытягивается с постоянной скоростью, то прилипшая часть корки остается на месте (зависает), а нижняя часть будет двигаться вниз. В результате происходит прорыв – выход жидкого металла из сердцевины слитка. Для предотвращения прорывов необходимо сообщать кристаллизатору возвратно-поступательное движение. Причем скорость опускания кристаллизатора задается несколько большей, чем скорость движения слитка. Допустимое время опережения ($\tau_{оп}$), необходимое для сваривания (залечивания) разрывов корочки слитка, должно составлять 0,1 – 0,3 с. Перемещение кристаллизатора осуществляется в направлении его оси. Необходимое время опережения при разных скоростях вытягивания достигается изменением частоты (ν) и амплитуды (δ) качания кристаллизатора путем синхронизации со скоростью вытягивания слитка. Произведение оптимальной частоты качания на время опережения называется критерием оптимального опережения ($K_{опт}$). Для синусоидального закона качания $K_{опт} = 0,274$, а при трапециальном законе с циклом 3:1 – $K_{опт} = 0,71 - 0,75$.

Таким образом, частоту качания кристаллизатора можно определить по формуле:

$$\nu = \frac{K_{опт}}{\tau_{оп}} \cdot 60, \quad (12)$$

где ν – частота качания кристаллизатора, мин^{-1} ;

$\tau_{оп}$ – допустимое время опережения, с.

Оптимальную амплитуду качания выбирают только для максимальной скорости вытягивания слитка с учетом $\tau_{оп}$ и принимают ее постоянной для всех скоростей вытягивания, меньших максимальной:

$$\delta = 14,8 \cdot \nu_{\text{макс}} \cdot \tau_{оп}, \quad \text{мм.} \quad (13)$$

где $\nu_{\text{макс}}$ – максимальная скорость вытягивания заготовки, м/мин;

$\tau_{оп}$ – допустимое время опережения, с.

В зависимости от типа и конструкции МНЛЗ амплитуда качания

кристаллизатора составляет 1 – 50 мм (чаще 2 – 15 мм), а частота от 20 до 600 циклов в минуту. Примеры параметров качания кристаллизатора действующих МНЛЗ представлены в приложении Д.

Необходимую частоту качания кристаллизатора можно также определить исходя из рабочей скорости вытягивания и амплитуды качания по уравнению

$$\nu = k_{\nu} \cdot \frac{v_p}{\delta} \cdot 10^3, \quad (14)$$

где v_p – рабочая скорость вытягивания заготовки, м/мин;

ν – частота качания кристаллизатора, мин⁻¹;

k_{ν} – коэффициент частоты (обычно принимают $k_{\nu} = 0,25 - 0,75$);

δ – амплитуда качания кристаллизатора, мм.

6 Скорость разливки и диаметр каналов сталеразливочных стаканов

Определение рабочей скорости вытягивания заготовки и диапазон допустимых ее значений позволяет рассчитать рабочую скорость разливки и возможный диапазон ее изменения.

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

$$q = \rho_{ст} \cdot a \cdot b \cdot v, \quad (15)$$

где q – скорость разливки, т/мин;

$\rho_{ст}$ – плотность затвердевшей стали в конце зоны вторичного охлаждения, т/м³;

v – скорость вытягивания заготовки, м/мин.

Плотность затвердевшей стали в конце зоны вторичного охлаждения вычисляется по формуле:

$$\rho_{ст} = \frac{\rho_0}{1 + 3 \cdot \alpha \cdot t_{кЗВО}}, \quad (16)$$

где ρ_0 – плотность стали при 0 °С, т/м³;

α – коэффициент линейного расширения твердой стали, равный $(1,4 - 1,5) \cdot 10^{-5}$ 1/град;

$t_{кЗВО}$ – температура затвердевшей стали в конце зоны вторичного охлаждения, °С.

Плотность стали при 0 °С (ρ_0) может быть принята по литературным данным или вычислена приближенно по содержанию легирующих элементов:

$$\rho_0 = \frac{100}{\frac{100 - \sum E_i}{7,85} + \sum \frac{E_i}{\rho_i}}, \quad (17)$$

где E_i – среднее содержание i -го легирующего элемента, %;
 ρ_i – плотность i -го легирующего элемента, т/м³[9].

Для получения непрерывнолитого сляба с поверхностью, свободной от поверхностных трещин, температура поверхности слитка в конце затвердевания должна быть на 30 – 50 °С выше, чем верхняя граница интервала провала пластичности. По некоторым данным [12] зона краснеломкости для различных марок сталей находится в интервале 816 – 900 °С и, следовательно, уровень температуры поверхности непрерывно-литого сляба при разгибании должен быть не менее 900 °С. Ниже приведены значения температуры поверхности в конце затвердевания ($t_{кзВО}$) для некоторых марок сталей [12]:

Марка стали	60	30ХНЗА	10ХСНД	Ст 3сп	17ГС	08Ю
$t_{кзВО}, ^\circ\text{C}$	1000	1005	950	980	1000	950

Приняв температуру поверхности заготовки в конце зоны вторичного охлаждения ($t_{кзВО}$) определяют рабочую скорость разливки q_p и ее предельные значения $q_{\text{мин}}$ и $q_{\text{макс}}$ по формуле (15) при подстановке в нее соответствующих значений скорости вытягивания заготовки $v_p, v_{\text{мин}}$ и $v_{\text{макс}}$.

Диаметры каналов стаканов в сталеразливочном и промежуточном ковшах вычисляются из выражения

$$q = k_p \cdot d^2 \cdot \sqrt{h}, \quad (18)$$

где k_p – коэффициент скорости разливки, т/(мин·мм²·м^{0,5});
 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 (количество ручьев МНЛЗ принимается в п. 1). При расчете диаметра канала для сталеразливочного ковша рекомендуется принимать $k_p = 1,2 \cdot 10^{-3}$ т/(мин·мм²·м^{1/2}) и $h = 0,5 - 1,0$ м, а для промежуточного ковша $k_p = 1,1 \cdot 10^{-3}$ т/(мин·мм²·м^{1/2}) и $h = 0,6 - 0,8$ м.

Диаметры каналов стаканов сталеразливочного и промежуточного ковшей принимается путем округления в большую сторону до целого значения, высчитанного по формуле (18).

7 Параметры настройки кристаллизатора и системы вторичного охлаждения

Кристаллизатор является важнейшим технологическим узлом МНЛЗ, так как в нем происходит формирование слитка. Основное назначение кристаллизатора – это формообразование слитка и отвод от кристаллизующейся стали такого количества тепла, которое обеспечивает условия для непрерывного формирования твердой корочки слитка достаточной толщины и прочности, чтобы она не разрушалась под действием трения и ферростатического давления на выходе из кристаллизатора.

Для заготовок малого сечения (толщина < 200 мм) применяют кристаллизаторы с параллельными стенками, а иногда делают прямую конусность для разливки сталей объем которых при кристаллизации увеличивается. При разливке в крупные заготовки для повышения эффективности работы нижней части кристаллизатора и предохранения от прорывов используют кристаллизаторы с обратной конусностью. В некоторых конструкциях кристаллизаторов предусматривается возможность изменения конусности. Для улучшения теплоотвода и уменьшения напряжения на широкой грани слябового и гранях гильзового кристаллизатора рабочие поверхности стенок кристаллизатора иногда делают профилированными (ребристыми, волнистыми, рифлеными). Чтобы предотвратить зависание слитка и обеспечить сваривание разрывов корочки, кристаллизатору сообщается возвратно-поступательное движение.

В задании указаны те размеры поперечного сечения НЛЗ, которые она должна иметь на выходе из МНЛЗ. В большинстве случаев кристаллизующаяся заготовка имеет несколько большие размеры поперечного сечения, которые постепенно уменьшаются по мере ее охлаждения. Поэтому поддерживающая система МНЛЗ настраивается так, чтобы расстояние между противоположными стенками кристаллизатора и противоположными роликами системы вторичного охлаждения монотонно уменьшалось в направлении движения заготовки. Обычно ширина и толщина поперечного сечения *слябовой* заготовки в верхней части кристаллизатора превышает заданные размеры на 2 – 3 и 4 – 5 %, а в нижней части – на 1 – 2 и 3 – 4 %, соответственно (рисунок 1). Ширина поперечного сечения *бюмовой* заготовки, как правило, превышает заданные размеры в верхней части кристаллизатора на 3 – 4 %, а толщина – на 3,5 – 4,5 %. В нижней части кристаллизатора при разливке *бюмовой* заготовки превышение размеров по ширине и толщине практически одинаковое и составляет 1,9 – 2,7 %. Расстояние между опорными поверхностями противоположных роликов системы вторичного охлаждения уменьшается линейно по длине зоны вторичного охлаждения.

Расчет параметров настройки МНЛЗ заключается в определении расстояний между противоположными стенками вверху и внизу кристаллизатора и между противоположными роликами на входе и выходе каждой зоны системы вторичного охлаждения.

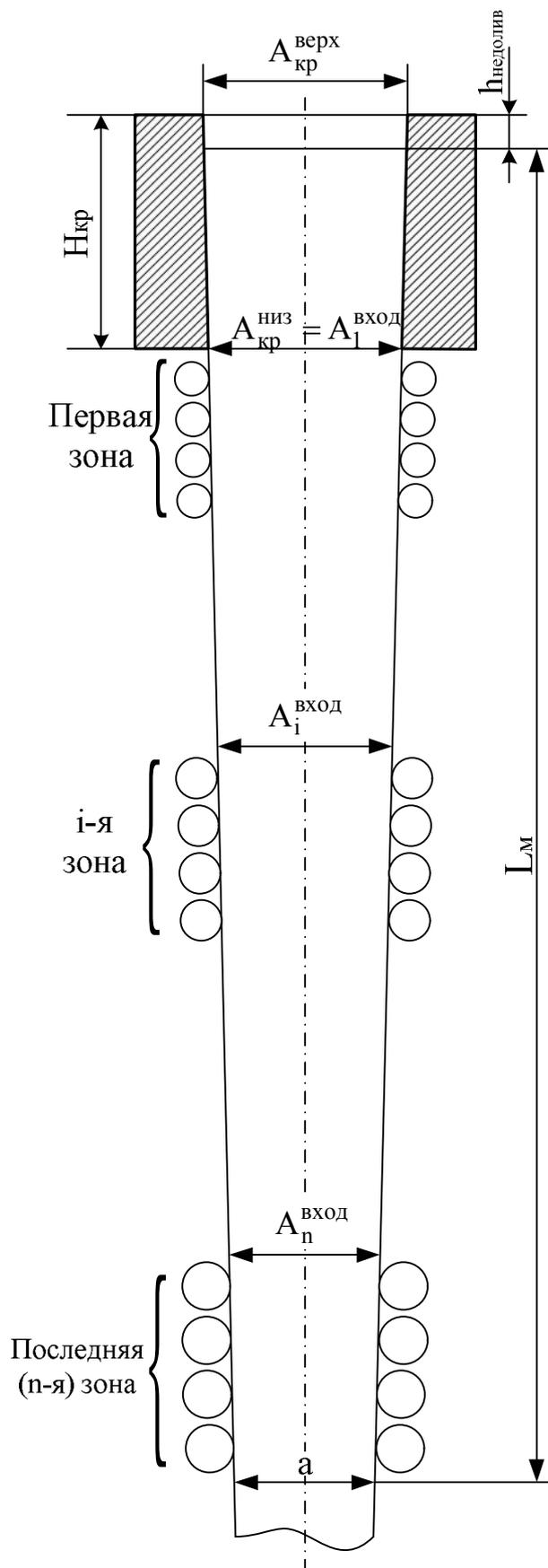


Рисунок 1 – Схема настройки МНЛЗ вертикального типа по толщине заготовки

Тогда, расстояние между противоположными стенками сверху и внизу кристаллизатора составит:

$$\begin{aligned}
A_{\text{кр}}^{\text{верх}} &= (1,04 \dots 1,05) \cdot a; \\
B_{\text{кр}}^{\text{верх}} &= (1,02 \dots 1,03) \cdot b; \\
A_{\text{кр}}^{\text{низ}} &= (1,03 \dots 1,04) \cdot a; \\
B_{\text{кр}}^{\text{низ}} &= (1,01 \dots 1,02) \cdot b.
\end{aligned}
\tag{19}$$

Изменение толщины и ширины заготовки от низа кристаллизатора до конца зоны вторичного охлаждения ($\Delta A = A_{\text{кр}}^{\text{низ}} - a$; $\Delta B = B_{\text{кр}}^{\text{низ}} - b$) распределяется пропорционально по длине зоны вторичного охлаждения. Зная количество зон вторичного охлаждения и их протяженность, определяют расстояния между противоположными опорными роликами на входе и выходе каждой зоны системы вторичного охлаждения. Так, расчет выставки роликов по толщине ЗВО проводится по уравнению:

$$\begin{aligned}
A_i^{\text{вход}} &= A_1^{\text{вход}} - \Delta A \cdot \frac{L_{\text{изво}}^{\text{вход}}}{L_{\text{ЗВО}}}; \\
A_i^{\text{выход}} &= A_1^{\text{вход}} - \Delta A \cdot \frac{L_{\text{изво}}^{\text{выход}}}{L_{\text{ЗВО}}}.
\end{aligned}
\tag{20}$$

где $A_1^{\text{вход}}$ – расстояние между противоположными роликам по толщине на входе в 1-ю зону вторичного охлаждения, равняющееся расстоянию по толщине между противоположными стенками внизу кристаллизатора, мм;
 ΔA – изменение толщины заготовки от низа кристаллизатора до конца зоны вторичного охлаждения, м;
 $L_{\text{изво}}^{\text{вход}}$ – расстояние от начала зоны вторичного охлаждения до входа в i -ю зону вторичного охлаждения, м;
 $L_{\text{изво}}^{\text{выход}}$ – расстояние от начала зоны вторичного охлаждения до выхода из i -й зоны вторичного охлаждения, м;
 $L_{\text{ЗВО}}$ – общая протяженность зоны вторичного охлаждения МНЛЗ, м.

Аналогично рассчитываются расстояния между противоположными роликами по ширине в каждой зоне вторичного охлаждения. Результаты расчетов представляют в виде таблицы 6.

Таблица 6 – Результаты расчетов параметров настройки МНЛЗ

Номер зоны	Расстояние между противоположными опорными поверхностями на входе в зону, мм		Расстояние между противоположными опорными поверхностями на выходе из зоны, мм	
	По толщине	По ширине	По толщине	По ширине
Кристаллизатор				
1 зона				
2 зона				
...				
n зона				

С целью усложнения расчета при определении параметров настройки роликов в зоне вторичного охлаждения системы можно учитывать толщины затвердевшего металла, усадку стали и нелинейное изменение температуры поверхности НЛЗ.

8 Охлаждение кристаллизатора

Для обеспечения высокой эффективности теплоотвода применяют кристаллизаторы с водяным охлаждением. В зависимости от способов изготовления применяются: сборный составной кристаллизатор, рабочие стенки которого выполнены из отдельных плит; блочный кристаллизатор, состоящий из монолитного материала, в котором выполнена рабочая полость; гильзовый кристаллизатор, рабочие стенки которого выполнены из цельной медной гильзы, а также другие типы конструкций.

Гильзовые кристаллизаторы имеют широкое применение для сортовых заготовок, а сборные – для блюмовых и слябовых МНЛЗ. Блочные кристаллизаторы не находят широкого распространения из-за сложности их изготовления.

Рабочие стенки сборных кристаллизаторов изготавливаются из тонких (10 – 25 мм) или толстых (50 – 70 мм) медных пластин. Охлаждающая вода проходит между пластинами и плитой (толщина каналов 5 мм) или в каналах, высверленных с шагом 45 мм непосредственно в толстых медных пластинах (диаметр каналов 20 мм, расстояние до рабочей поверхности 15 – 20 мм). В последнее время сборные кристаллизаторы выполняются с раздвижными стенками для быстрого изменения сечения кристаллизатора. В радиальном кристаллизаторе медные плиты образуют внутреннюю полость, кривизна которой соответствует радиусу технологической оси МНЛЗ.

Длина кристаллизатора зависит от сечения разливаемых слитков и в общем случае может изменяться от 300 до 1200 мм. Практический опыт эксплуатации современных МНЛЗ показал, что надежная работа машины при удовлетворительном качестве слитков может обеспечиваться кристаллизатором длиной 800 – 1000 мм.

Для анализа тепловой работы кристаллизатора и при проектировании нового кристаллизатора необходимо рассчитать расход охлаждающей воды, скорости ее движения в каналах рабочих стенок кристаллизатора, а также определить

температуру поверхности слитка и толщину твердой корочки на выходе из кристаллизатора. Расход охлаждающей воды и скорость ее движения необходимо рассчитывать при рабочей скорости вытягивания заготовки. Для этой же скорости вытягивания заготовки определяют температуру поверхности слитка и толщину твердой корочки на выходе из кристаллизатора.

Основным показателем, характеризующим режим охлаждения кристаллизатора, является расход охлаждающей воды. Предварительно перед расчетом расхода воды необходимо, пользуясь вышеприведенными рекомендациями, выбрать диаметр каналов и определить их число. Расход воды на охлаждение кристаллизатора должен быть таким, чтобы выполнялось два условия:

- 1) температура воды на выходе из кристаллизатора не должна превышать 40 – 45 °С с тем, чтобы не происходило отложение растворенных в ней солей;
- 2) скорость движения воды в каналах должна быть не менее 5 м/с для того, чтобы предотвратить образования застойных зон с локальным перегревом.

Расход воды, обеспечивающий выполнение первого условия, определяется следующий образом. Сначала выбором или расчетом определяются исходные данные:

- температура воды на входе в кристаллизатор (15 – 25 °С);
- температура воды на выходе из кристаллизатора (40 – 45 °С);
- перепад температур воды в кристаллизаторе $\Delta t_{в}$, °С;
- средний перепад температуры между температурой жидкого металла и температурой поверхности кристаллизующейся заготовки Δt (350 – 400 °С);
- средняя толщина слоя затвердевшего металла в кристаллизаторе ξ_k (определяется расчетом из выражений 6 – 8 при рабочей скорости вытягивания) по уравнению:

$$\xi_k = k \cdot \sqrt{\frac{\tau_{кр}}{2 \cdot K_{\phi}}} = k \cdot \sqrt{\frac{h_{кр}}{2 \cdot K_{\phi} \cdot v_p}} = k \cdot \sqrt{\frac{H_{кр} - h_{недолив}}{2 \cdot K_{\phi} \cdot v_p}}, \quad (21)$$

где ξ_k – средняя толщина корочки металла в кристаллизаторе, мм;

$\tau_{кр}$ – продолжительность затвердевания заготовки в кристаллизаторе, мин;

K_{ϕ} – коэффициент формы поперечного сечения заготовки (см. раздел 3);

k – коэффициент затвердевания, который для спокойной стали в зависимости от ее состава и условия затвердевания изменяется в пределах 24 – 28 мм/мин^{1/2} (см. раздел 3);

$h_{кр}$ – рабочая (активная) высота кристаллизатора, то есть уровень металла в кристаллизаторе с учетом недолива, м;

v_p – рабочая скорость вытягивания НЛЗ, м/мин;

$H_{кр}$ – высота кристаллизатора, м;

$h_{недолив}$ – величина недолива жидкого металла до верхнего края медной гильзы кристаллизатора, м.

После этого вычисляется средняя плотность теплового потока от заготовки к кристаллизатору

$$Q = \lambda \cdot \frac{\Delta t}{\xi_k}, \quad (22)$$

где Q – средний тепловой поток, Вт/м²;

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

ξ_k – средняя толщина слоя затвердевшего металла в кристаллизаторе, м;

Δt – средний перепад температуры между температурой жидкого металла и температурой поверхности кристаллизующейся заготовки, °С.

Рекомендуется принимать следующие значения коэффициента теплопроводности λ :

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

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

Затем вычисляется расход воды, обеспечивающий принятую температуру ее на выходе из кристаллизатора:

$$G_{кр} = \frac{3600 \cdot Q \cdot F_{кр}}{\rho_v \cdot C_v \cdot \Delta t_v}, \quad (23)$$

где $G_{кр}$ – расход воды на кристаллизатор по рассматриваемому условию, м³/ч;

ρ_v – плотность воды, кг/м³;

C_v – удельная теплоемкость воды, которую при температуре 20 – 40 °С можно принять равной 4178 Дж/(кг·К);

Δt_v – перепад температур воды в кристаллизаторе, °С;

$F_{кр}$ – площадь поверхности кристаллизатора (м²), воспринимающая тепловой поток, определяется из выражения:

$$F_{кр} = (A_{кр}^{верх} + A_{кр}^{низ} + B_{кр}^{верх} + B_{кр}^{низ}) \cdot H_{кр}, \quad (24)$$

где $H_{кр}$ – высота кристаллизатора (принимается в п.4), м;

$A_{кр}^{верх}, B_{кр}^{верх}$ – расстояние между противоположными стенками по толщине и ширине верхней части кристаллизатора, м;

$A_{кр}^{низ}, B_{кр}^{низ}$ – расстояние между противоположными стенками по толщине и ширине нижней части кристаллизатора, м.

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

$$G'_{кр} = 900 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot v_v \cdot m, \quad (25)$$

где $G'_{кр}$ – расход воды на кристаллизатор, $\text{м}^3/\text{ч}$;
 d – диаметр канала (обычно 0,015 – 0,025 м), м;
 v_v – скорость движения воды (обычно 7 – 10 м/с), м/с;
 m – количество каналов, определяемое из выражения:

$$m = \frac{P_{кр}}{d + h} + 1, \quad (26)$$

где d – диаметр канала, м;
 h – расстояние между каналами, м (обычно 30 – 50 мм);
 $P_{кр}$ – средний периметр кристаллизатора (м), определяемый из
 выражения $P_{кр} = A_{кр}^{верх} + A_{кр}^{низ} + B_{кр}^{верх} + B_{кр}^{низ} + 2 \cdot L_{кр}$,
 где $L_{кр}$ – толщина стенки кристаллизатора (50 – 80 мм).

После вычисления требуемого расхода воды, исходя из первого и второго условия, принимается больший из них.

9 Вторичное охлаждение заготовки

Расчет вторичного охлаждения проводится с целью определения требуемого расхода охладителя в каждой зоне вторичного охлаждения, а также на всю МНЛЗ с учетом ее конструктивных особенностей. В качестве охладителя используется вода (струйное охлаждение) или водовоздушная смесь (применяются форсунки с распылением воды сжатым воздухом). Водовоздушная система охлаждения более предпочтительна, поскольку обеспечивает распыление до более мелких капель, что повышает равномерность распыления. Однако, непосредственно под кристаллизатором, как правило, применяют струйное охлаждение, обеспечивающее более жесткое и интенсивное охлаждение корочки НЛЗ и опорных роликов, предотвращая их перегрев. Поэтому перед выполнением расчета необходимо выбрать применяемую систему охлаждения в ЗВО.

Режим вторичного охлаждения НЛЗ должен быть таким, чтобы выдерживался оптимальный температурный режим затвердевшей оболочки.

Температура поверхности заготовки в конце зоны вторичного охлаждения ($t_{кЗВО}$) принимается в п. 6.

Температура поверхности заготовки на выходе из кристаллизатора (в начале зоны вторичного охлаждения) вычисляется по формуле:

$$t_{нач} = t_{ликв} - \left(70 + k_t \cdot \frac{H_{кр} - h_{недолив}}{v_p} \right), \quad (27)$$

где k_t – температурный коэффициент, град/мин.

Значение температурного коэффициента в формуле (27) зависит от химического состава разливаемой стали и обычно изменяется в диапазоне от 175 до 200 град/мин.

Установив температуру в начале и в конце зоны вторичного охлаждения, приступают к расчету режима вторичного охлаждения (по каждой зоне), обеспечивающего быстрое затвердевание непрерывнолитой заготовки и отсутствие на ней различных дефектов.

Расчет режима вторичного охлаждения заготовки ведется по зонам в соответствии с конструкцией МНЛЗ при рабочей скорости вытягивания (v_p). Так как по длине любой зоны вторичного охлаждения все показатели, характеризующие тепловое состояние кристаллизующейся заготовки, непрерывно меняются, то расчет ведется для середины зоны.

Расчет каждой зоны производится в следующей последовательности:

1 Определяется время, прошедшее от начала кристаллизации

$$\tau_3^n = \frac{L_n}{v_p}, \quad (28)$$

где τ_3^n - время затвердевания НЛЗ от начала кристаллизации до середины n-зоны вторичного охлаждения, м

L_n – расстояние от верха кристаллизатора (с учетом недолива) до середины n-зоны вторичного охлаждения секции, м.

2 Определяется толщина слоя затвердевшего металла в середине каждой зоны вторичного охлаждения по формуле:

$$\xi_i = k \cdot \sqrt{\frac{\tau_3^n}{K_\phi}}, \quad (29)$$

где ξ_i – толщина слоя затвердевшего металла в середине i - го участка зоны вторичного охлаждения, мм;

$\tau_{кр}$ – продолжительность затвердевания заготовки в кристаллизаторе, мин;

K_ϕ – коэффициент формы поперечного сечения заготовки (см. раздел 3);

k – коэффициент затвердевания, который для спокойной стали в зависимости от ее состава и условия затвердевания изменяется в пределах 24 — 28 мм/мин^{1/2} (см. раздел 3).

3 Рассчитывается температура поверхности заготовки в середине каждой зоны вторичного охлаждения по формуле:

$$t_{повi} = t_{нач} - (t_{нач} - t_{кЗВО}) \cdot \left(\frac{L_{ср}}{L_{ЗВО}} \right)^{1/5}, \quad (30)$$

где $t_{\text{пов}i}$ – температура поверхности заготовки i -го участка зоны вторичного охлаждения, °С;

$t_{\text{нач}}$ – температура поверхности по оси верхней грани заготовки в начале зоны вторичного охлаждения, °С;

$t_{\text{кЗВО}}$ – температура поверхности по оси верхней грани заготовки в конце зоны вторичного охлаждения, °С;

$L_{\text{изВО}}^{\text{ср}}$ – расстояние от начала зоны вторичного охлаждения до середины i -го участка, м;

$L_{\text{ЗВО}}$ – общая протяженность зоны вторичного охлаждения машины, м.

4 Подсчитывается плотность теплового потока.

4.1 От жидкой сердцевины к поверхности заготовки через слой затвердевшего металла $Q_{\text{вн}}$ (Вт/м²) по формуле:

$$Q_{\text{вн}} = \lambda \cdot \frac{\Delta t_i}{\xi_i}, \quad (31)$$

где $Q_{\text{вн}}$ – плотность теплового потока от жидкой сердцевины к поверхности заготовки, Вт/м²;

ξ_i – толщина слоя затвердевшего металла в середине i -й зоны вторичного охлаждения, м

Δt_i – перепад температуры по толщине затвердевшего слоя металла (°С) определяется по формуле:

$$\Delta t_i = t_{\text{ликв}} - t_{\text{пов}i}. \quad (32)$$

4.2 С поверхности заготовки в окружающую среду излучением:

$$Q_{\text{изл}} = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left[\left(\frac{t_{\text{пов}i} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{\text{окр}} + 273}{100} \right)^4 \right], \quad (33)$$

где $Q_{\text{изл}}$ – плотность перечисленных выше тепловых потоков, Вт/м²;

ε – степень черноты поверхности заготовки (расчетах рекомендуется принимать $\varepsilon = 0,7 - 0,8$);

C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный 5,67 Вт/(м²·К);

$t_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды (в упрощенных расчетах принимается равной 20 – 30 °С), °С;

$t_{\text{пов}i}$ – температура поверхности заготовки в середине i -й зоны вторичного охлаждения, °С.

4.3 С поверхности заготовки в окружающую среду конвекцией:

$$Q_{\text{конв}} = \alpha_{\text{конв}} \cdot (t_{\text{пов}} - t_{\text{окр}}), \quad (34)$$

где $Q_{\text{конв}}$ – плотность перечисленных выше тепловых потоков, Вт/м²;
 $\alpha_{\text{конв}}$ – коэффициент конвективной теплоотдачи с поверхности заготовки, Вт/(м² · град).

В упрощенных расчетах можно считать, что коэффициент конвективной теплоотдачи зависит от интенсивности обдува поверхности заготовки воздухом и может быть определен по формуле:

$$\alpha_{\text{конв}} = 6,16 + 4,18 \cdot v_{\text{об}}, \quad (35)$$

где $v_{\text{об}}$ – скорость движения потока воздуха, подаваемого на заготовку, м/с.

При водовоздушном вторичном охлаждении заготовки рекомендуется принимать $v_{\text{об}} = 2 - 5$ м/с. В случае водяного вторичного охлаждения воздух на поверхность заготовки не подается, поэтому $v_{\text{об}} = 0$.

5 Вычисляется плотность орошения поверхности заготовки водой

$$g_{\text{ор}} = \frac{Q_{\text{вн}} - Q_{\text{изл}} - Q_{\text{конв}}}{\eta}, \quad (36)$$

где $g_{\text{ор}}$ – плотность орошения поверхности заготовки, м³/(м² · ч);
 η – охлаждающий эффект воды, Вт·ч/м³.

При расчетах плотности орошения рекомендуется принимать $\eta = 48000 - 52000$ Вт·ч/м³ – при водяном вторичном охлаждении; $\eta = 57000 - 60000$ Вт·ч/м³ – при водовоздушном вторичном охлаждении.

6 Рассчитывается расход воды

$$G_{\text{вода}} = g_{\text{ор}} \cdot F_{\text{ори}}, \quad (37)$$

где $G_{\text{вода}}$ – расход воды, м³/ч;

$F_{\text{ори}}$ – суммарная площадь орошаемой поверхности i -й зоны вторичного охлаждения, определяемая исходя из сечения заготовки и длины зоны вторичного охлаждения, м².

В том случае, если на МНЛЗ отливаются НЛЗ, имеющие прямоугольное поперечное сечение с отношением сторон $b/a \geq 1,5$, то водой охлаждаются только широкие грани. При этом площадь орошаемой поверхности определяется по

формуле

$$F_{opi} = 2 \cdot (B_i - 2 \cdot \xi_i) \cdot L_{изво}, \quad (38)$$

где $L_{изво}$ – длина i -й зоны вторичного охлаждения, м;

B_i – ширина отливаемой заготовки в середине i -го участка зоны вторичного охлаждения, м.

В остальных случаях охлаждаются водой все четыре грани заготовки, при этом суммарная площадь орошаемой поверхности рассчитывается по уравнению

$$F_{opi} = 2 \cdot (B_i - 2 \cdot \xi_i) \cdot L_{изво} + 2 \cdot (A_i - 2 \cdot \xi_i) \cdot L_{изво}, \quad (39)$$

где A_i , B_i – толщина и ширина отливаемой заготовки в середине i -го участка зоны вторичного охлаждения, м.

Значения толщины и ширины отливаемой заготовки в середине i -го участка зоны вторичного охлаждения можно определять как среднее между аналогичными величинами на входе и выходе из i -й зоны вторичного охлаждения по данным таблицы 6 или определять из выражений:

$$\begin{aligned} A_i^{cp} &= A_1^{вход} - \Delta A \cdot \frac{L_{изво}^{cp}}{L_{зво}}; \\ B_i^{cp} &= B_1^{вход} - \Delta B \cdot \frac{L_{изво}^{cp}}{L_{зво}}, \end{aligned} \quad (40)$$

где $A_1^{вход}$ – расстояние между противоположными роликам по толщине на входе в 1-ю зону вторичного охлаждения, мм;

$B_1^{вход}$ – расстояние между противоположными роликам по ширине на входе в 1-ю зону вторичного охлаждения, мм;

ΔA , ΔB – изменение толщины и ширины заготовки от низа кристаллизатора до конца зоны вторичного охлаждения, м;

$L_{изво}^{cp}$ – расстояние от начала зоны вторичного охлаждения до середины i -го участка, м;

$L_{зво}$ – общая протяженность зоны вторичного охлаждения МНЛЗ, м.

При разливке стали на МНЛЗ радиального и криволинейного типов охлаждающая вода, подаваемая по малому радиусу, используется более эффективно. Поэтому расход воды по малому радиусу тех зон, где угол наклона оси заготовки к горизонту менее 45° , должен быть уменьшен по сравнению с расчетом на 15 – 20 %. В упрощенных расчетах это можно не учитывать.

Для водовоздушной системы вторичного охлаждения необходимо также рассчитать и расход воздуха по зонам. Для качественного распыления воды нужно выдерживать определенное соотношение между расходами воды и воздуха. Величина этого соотношения определяется конструкцией форсунок и может меняться в широких пределах. Для ориентировочных расчетов, проводимых без учета конструкции форсунок, можно принимать соотношение расхода воды к расходу воздуха ($G_{\text{вода}}/G_{\text{возд}}$) в пределах от (1:20) до (1:200).

Результаты расчетов сводятся в таблицу 7. По данным таблицы 7 строятся графики зависимостей толщины корочки по длине ЗВО и расхода охладителя по зонам вторичного охлаждения.

Таблица 7 – Результаты расчета зоны вторичного охлаждения

Параметр	Значения параметров ЗВО (для середины зоны)					
	1	2	3	...		n
Охлаждающая среда						
τ_3 , МИН						
ξ , ММ						
$t_{\text{пов}}$, °С						
Δt , °С						
$\alpha_{\text{конв}}$, Вт/(м ² · град)						
$Q_{\text{вн}}$, Вт/м ²						
$Q_{\text{изл}}$, Вт/м ²						
$Q_{\text{конв}}$, Вт/м ²						
$g_{\text{ор}}$, м ³ /(м ² · ч)						
$F_{\text{ор}}$, м ²						
$G_{\text{воды}}$, м ³ /ч						
$G_{\text{воды}}$, л/МИН						
$G_{\text{вода}}/G_{\text{возд}}$						
$G_{\text{воздуха}}$, м ³ /ч						
$G_{\text{воздуха}}$, л/МИН						

После определения расхода охладителя по всем зонам подсчитывается общий и удельный расходы воды и воздуха на вторичное охлаждение (на один ручей)

$$G_{\text{вт}} = \sum_{i=1}^n G_i; \quad (41)$$

$$G_{\text{уд}} = \frac{G_{\text{вт}}}{60 \cdot q_p},$$

где $G_{\text{вт}}$ – общий (суммарный) расход воды и воздуха на вторичное охлаждение, м³/ч;
 G_i – расход воды на вторичное охлаждение i -ой зоны, м³/ч;
 $G_{\text{уд}}$ – удельный расход воды и воздуха на вторичное охлаждение, м³/т;
 q_p – рабочая скорость разлива (в ручье), т/мин.

В зависимости от количества ручьев МНЛЗ определяются расходы воды и воздуха на вторичное охлаждение для всей машины.

10 Длительность разливки плавки и производительность МНЛЗ

Машинное время разливки зависит от технических возможностей МНЛЗ, массы разливаемого металла и площади поперечного сечения получаемой литой заготовки. Без учета синхронизации работы отделения выплавки и разливки стали длительность разливки плавки (машинное время разливки) можно определить по формуле

$$\tau_m = \frac{M}{N \cdot \rho_{ст} \cdot F \cdot v_p}, \quad (42)$$

где τ_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;

F – площадь поперечного сечения получаемой литой заготовки, м².

Годовая производительность МНЛЗ в этом случае подсчитывается по формуле

$$П = M \cdot \frac{1440}{1,15 \cdot Z \cdot \left(\tau_m + \frac{\tau_{пс}}{S} \right) + 1,15 \cdot (100 - Z) \cdot (\tau_m + \tau_{п})} \cdot g_r \cdot D, \quad (43)$$

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. Для расчета годовой производительности МНЛЗ можно принимать $Z = 70 - 90$ %.

Нормативными значениями выхода годного на разливке (g_r) составляют [7, 11]: для слябовой заготовки – 95 %; для сортовой – 94 %. Фактические значения выхода

годного достигают 98 % и более.

Фактическое время разливки (D) следует брать согласно данным практики (в случае реконструкции МНЛЗ действующего цеха) или согласно рекомендациям (действующим нормативам [7, 8, 11]):

- 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. Рекомендуется принимать следующие значения:

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

Подготовка машины после разливки одиночными плавками ($\tau_{п}$) не должна превышать 60 мин. [5, 8, 11], поэтому при разливке одиночных плавков длительность паузы как для слябовых, так и для сортовых МНЛЗ рекомендуется принимать 50 – 60 мин.

Конструкция МНЛЗ всё время совершенствуется в сторону уменьшения времени их подготовки к разливке. При использовании в расчете более прогрессивных значений $\tau_{п}$, это должно иметь соответствующее обоснование.

Разливка методом «плавка на плавку» позволяет увеличить производительность МНЛЗ в 2 – 3 раза. Для новых сталеплавильных цехов рекомендуется разливать всю сталь следующими сериями [8]:

- слябовые машины – 10 плавков;
- сортовые машины – 4 плавки.

Поэтому среднее количество плавков в одной серии можно упрощенно принять равным $S = 6 - 10$ плавков или выбрать исходя из технических и технологических возможностей производства.

В настоящее время практикуется разливка методом «плавка на плавку» большими сериями по несколько десятков в одной (до 100 и более). Но в каждом отдельном случае, при отклонении от рекомендуемых значений, принимаемое число плавков в серии должно иметь соответствующее обоснование.

При необходимости учета синхронизации работы отделения выплавки металла с отделением непрерывной разливки стали (ОНРС) длительность разливки плавки и длительность пауз необходимо принимать кратными ритму подачи ковшей. В конвертерном цехе с двумя работающими конвертерами ковши с жидким металлом поступают в ОНРС обычно через 15 – 25 мин, а в электросталеплавильном цехе – через 60 – 90 мин.

Основным видом непрерывной разливки в современных конвертерных цехах является метод «плавка на плавку». Это, возможно, осуществить только при строгой синхронизации длительности плавки, внеагрегатной обработки и разливки стали. К моменту окончания разливки одного ковша (опорожнения) должен быть готов следующий. Поэтому независимо от расчетного значения машинного времени разливки фактическая длительность её принимается обычно кратной длительности

цикла одной, полутора, двух и т.д. плавков.

В любом случае принимаемое фактическое время разливки (τ_{ϕ}) должно удовлетворять неравенству:

$$\tau_p^g > \tau_{\phi} > \tau_M, \quad (44)$$

где τ_p^g – допустимая (максимально возможная) продолжительность разливки, мин;

τ_M – машинное (расчетное) время разливки, мин.

Допустимая продолжительность разливки зависит от вместимости сталеразливочного ковша. Данные о максимально допустимой продолжительности разливки сведены в таблицу 8.

Таблица 8 – Максимально допустимая продолжительность разливки [7, 11]

Емкость сталеразливочного ковша, т	12	25	50	100	160	200	300	350	400
Продолжительность разливки, мин	40	50	60	75	85	90	110	110	110

При фактической длительности меньшей машинной из кристаллизатора будет выходить заготовка с корочкой недостаточной толщины. Последнее зачастую сопровождается появлением трещин на литой заготовке (браком) и даже прорывом металла (аварийная ситуация), и выходом на длительное время машины из строя.

При длительности разливки, превышающей допустимые значения, происходит переохлаждение металла в ковше, резко снижается качество литой заготовки, а также возможны аварийные ситуации и даже выход из строя МНЛЗ. В этом случае необходимо предусмотреть меры для ускорения разливки (опорожнение ковша). К ним относятся (приводятся в порядке, рекомендуемом к рассмотрению):

- 1) увеличение числа ручьев на машине до максимально допустимых значений;
- 2) использование новых машин с более высокими скоростями вытягивания;
- 3) переход на получение литой заготовки большего сечения с последующим его доведением до нужных размеров на редуцирующем оборудовании.

Решая совместно приведенные уравнения, можно определить необходимое количество ручьев на одной МНЛЗ для обеспечения требуемой производительности. Округлив полученное значение в большую сторону, необходимо уточнить окончательное значение производительности одной МНЛЗ.

11 Определение требуемого числа МНЛЗ

Число постоянно работающих машин (M_p) можно определить из выражения:

$$M_p = \frac{\sum \Pi}{\Pi}, \quad (45)$$

где Π – расчетная годовая производительность одной МНЛЗ, т/год;

$\Sigma\Pi$ – годовая производительность заготовок, определенного типоразмера, т (по заданию – Приложение А).

При получении по формуле (45) дробного числа машин, их количество (постоянно работающих) округляется, как правило, в большую сторону. В меньшую сторону округление делается лишь в том случае, когда имеется возможность увеличить пропускную способность машин. Это можно сделать за счет увеличения числа плавков в серии, сокращение затрат на подготовку и ремонт машин, лучшей организацией работы цеха в целом (хорошей синхронизации работы конвертеров, ДСП, АДС и МНЛЗ) и прочее.

Число постоянно работающих машин определяются отдельно для сортовых и слябовых, разных типоразмеров.

12 Пример расчета параметров непрерывной разливки

Исходными данными для расчета являются: марка стали 17Г1С, масса плавки (вместимость сталеразливочного ковша) 240 т, слябовая заготовка сечением 250 × 700 мм, годовой объем производства 0,6 млн.т.

12.1 Выбор вида и типоразмера МНЛЗ

В соответствии с исходными данными принимаем для расчета слябовую МНЛЗ, обеспечивающую формирование заготовки сечением 250 × 700 мм.

Для рассматриваемого примера выбираем МНЛЗ криволинейного типа с вертикальным участком, имеющую компоновочные и конструктивные характеристики, аналогичные МНЛЗ №2 ОАО «Уральская Сталь».

Общие технические характеристики МНЛЗ, используемые в расчете, приведены в таблице 9.

Таблица 9 - Технические характеристики слябовой МНЛЗ

Наименование параметра		Значение параметра
Тип машины		Слябовая криволинейная с вертикальным участком
Масса плавки, т		240
Емкость промковша, т		50
Количество ручьев, шт		2
Радиусы изгиба, м		R1 = 60 – R6 = 11
Радиусы выпрямления, м		R7 = 10,5 – R10 = 33
Металлургическая длина, м		30,305
Кристаллизатор		Прямой, вертикальный
- длина, мм		900
- частота качания, качаний в мин		Определяется расчетом
- амплитуда качания, мм		Определяется расчетом
Длина зон вторичного охлаждения, м:	1 зона – «подбой»	0,2
	2 зона – секция «0»	1,21
	3 зона – секция 1	2,1
	4 зона – секция 2-4	4,55
	5 зона – секция 5-7	4,756
	6 зона – секция 8-11	7,14
	7 зона – секция 12-16	9,025
Скорость вытягивания по механизмам, м/мин		0,25 – 2,0
Максимальная скорость разливки, м/мин		Определяется расчетом
Ширина слябов, мм		700
Толщина слябов, мм		250

С учетом заданного годового объема производства, значительной емкости сталеразливочного ковша и небольшого сечения НЛЗ, предварительно принимаем

количество ручьев МНЛЗ, равное двум.

12.2 Расчет параметров жидкого металла

Основными параметрами жидкого металла являются: допустимое содержание вредных примесей, температура металла в сталеразливочном и промежуточном ковшах.

Вредные примеси в стали, такие как сера и фосфор, снижая механическую прочность и свариваемость стали, существенно осложняют технологию непрерывной разливки из-за увеличения опасности аварийных прорывов жидкого металла под кристаллизатором и внеплановых остановок разливки. Поэтому обычно верхний предел содержания серы и фосфора в стали, разливаемой на МНЛЗ, устанавливается не более 0,025 % каждого элемента. Принимаем содержание серы и фосфора в жидкой стали на уровне 0,015 %.

Температура разливаемого металла оказывает существенное влияние, как на технологию непрерывной разливки, так и на качество получаемой заготовки. Температуру металла в сталеразливочном и промежуточном ковшах определяем по уравнениям (1) исходя из температуры ликвидус и уровня перегрева металла.

Температура ликвидус определяется из выражения (2) в зависимости от химического состава стали. В рассматриваемом примере разливается сталь марки 17Г1С, состав которой приведен в таблице 10. Для определения температуры ликвидус выбираем состав стали с учетом ранее принятых содержаний в ней серы и фосфора (см. таблицу 10).

Таблица 10 – Химический состав стали марки 17Г1С

Элемент	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
Интервалы	0,15-0,20	0,4-0,6	1,15-1,6	до 0,3	до 0,040	до 0,035	до 0,3	до 0,3
Принято	0,17	0,5	1,4	-	0,015	0,015	-	-

Тогда по уравнению (2) с учетом выбранного состава стали, температура ликвидус составит

$$t_{\text{ликв}} = 1539 - 73 \cdot 0,17 - 12 \cdot 0,5 - 3 \cdot 1,4 - 30 \cdot 0,015 - 28 \cdot 0,015 = 1509 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Оптимальный перегрев металла над температурой ликвидус в промежуточном ковше составляет 15 – 30 °С. Принимаем 25 °С.

Оптимальный перегрев металла в сталеразливочном ковше над температурой в промковше составляет 40 – 50 °С. Принимаем 40 °С.

Тогда оптимальные температуры металла в промежуточном и сталеразливочном ковшах составят:

$$t_{\text{пр.к}} = t_{\text{ликв}} + \Delta t_{\text{пр.к}} = 1509 + 25 = 1533 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_{\text{ст.к}} = t_{\text{пр.к}} + \Delta t_{\text{ст.к}} = 1533 + 40 = 1583 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

12.3 Продолжительность затвердевания НЛЗ

Продолжительность затвердевания НЛЗ определяется размерами ее поперечного сечения и условиями затвердевания по уравнению (3).

В рассматриваемом примере при толщине заготовки $a = 250$ мм и ширине $b = 700$ мм, отношение $b/a = 2,8 > 2$, поэтому коэффициент формы $K_\phi = 1$.

Величину коэффициента затвердевания k выбираем для разливки спокойной стали из диапазона $24 - 28$ мм/мин^{1/2}. С учетом выбранной температуры перегрева металла в промежуточном ковше (25 °С), принимаем коэффициент затвердевания $k = 25$ мм/мин^{1/2}.

Тогда по уравнению (3) продолжительность затвердевания НЛЗ составит

$$\tau_3 = 1 \cdot \left(\frac{250}{2 \cdot 25} \right)^2 = 25 \text{ мин.}$$

12.4 Скорость вытягивания заготовки

Установление скоростного режима заключается в определении диапазона допустимых скоростей вытягивания заготовки и рабочей скорости вытягивания.

Рабочая скорость вытягивания НЛЗ определяется индивидуально для каждой МНЛЗ, сечения заготовки и марки разливаемой стали. При соблюдении требуемых параметров жидкого металла, рабочая скорость вытягивания может быть рассчитана по формуле (4) в зависимости от сечения заготовки и марки стали, определяющей значение коэффициента скорости вытягивания k_v . Для стали 17Г1С, относящейся к низколегированным конструкционным сталям для сварных конструкций, коэффициент скорости вытягивания для слябовой заготовки (из таблицы 2) равен $k_v = 0,2$ м²/мин.

Тогда, для слябовой заготовки сечением 250×700 мм, рабочая скорость вытягивания составит

$$v_p = k_v \cdot \frac{a + b}{a \cdot b} = 0,2 \cdot \frac{0,25 + 0,7}{0,25 \cdot 0,7} = 1,085 \text{ м/мин.}$$

По уравнениям (5) находим диапазон допустимых скоростей вытягивания заготовки:

$$v_{\text{мин}} = 0,5 \cdot v_p = 0,5 \cdot 1,085 = 0,54 \text{ м/мин;}$$

$$v_{\text{макс}} = 1,5 \cdot v_p = 1,5 \cdot 1,085 = 1,63 \text{ м/мин.}$$

Максимально допустимая скорость вытягивания заготовки ($v_{\text{макс}}$) должна обеспечивать формирование минимально допустимой толщины корочки металла на выходе из кристаллизатора ($\xi_{\text{мин}}$), которая составляет $0,01 - 0,02$ м. Для проверки выполнения данного условия, рассчитываем толщину затвердевшей корочки металла на выходе из кристаллизатора по уравнению (6).

Коэффициент формы поперечного сечения заготовки и коэффициент затвердевания были установлены в п. 12.3: $K_\phi = 1$, $k = 25$ мм/мин^{1/2}.

Продолжительность пребывания НЛЗ в кристаллизаторе ($\tau_{\text{кр}}$) определяется по уравнению (7) в зависимости от максимальной скорости вытягивания и

конструкционно-технологических параметров кристаллизатора. Для принятого в расчете кристаллизатора длиной 900 мм (см. таблицу 9), принимая величину недолива $h_{\text{недолив}} = 0,1$ м, продолжительность пребывания НЛЗ в кристаллизаторе составит

$$\tau_{\text{кр}} = \frac{h_{\text{кр}}}{v_{\text{макс}}} = \frac{H_{\text{кр}} - h_{\text{недолив}}}{v_{\text{макс}}} = \frac{0,9 - 0,1}{1,63} = 0,49 \text{ мин.}$$

Тогда, толщина затвердевшей корочки металла на выходе из кристаллизатора составит

$$\xi_{\text{кр}} = k \cdot \sqrt{\frac{\tau_{\text{кр}}}{K_{\text{ф}}}} = 25 \cdot \sqrt{\frac{0,49}{1}} = 17,5 \text{ мм.}$$

Полученная толщина корочки находится в допустимых пределах, что подтверждает правильность выбора максимальной скорости вытягивания заготовки.

Рабочая скорость вытягивания определяет глубину лунки жидкого металла в кристаллизующейся НЛЗ и составляет

$$L_{\text{ж}} = \tau_{\text{з}} \cdot v_{\text{р}} = 25 \cdot 1,085 = 27,125 \text{ м.}$$

Расчет протяженности жидкой фазы в кристаллизующейся НЛЗ по уточненной формуле (10) основывается на максимальной скорости вытягивания. Для слябовой заготовки сечением 250×700 мм, коэффициент K для расчета протяженности жидкой фазы при отношении $b/a = 700/250 = 2,8$ составляет $K = 314$. Тогда при максимальной скорости вытягивания 1,63 м/мин, протяженность жидкой фазы рассчитываемой НЛЗ составит

$$L'_{\text{ж}} = K \cdot a^2 \cdot v_{\text{макс}} = 314 \cdot 0,250^2 \cdot 1,63 = 31,99 \text{ м.}$$

Обязательным условием получения плотной осевой зоны НЛЗ является соблюдение соотношения (11). Для рассматриваемого примера это соотношение составляет

$$\frac{L'_{\text{ж}}}{L_{\text{м}}} = \frac{31,99}{30,305} = 1,06 > 0,9,$$

То есть условие не выполняется и требуется корректировка максимальной скорости вытягивания. Принимаем максимальную скорость вытягивания 1,4 м/мин, при которой $L'_{\text{ж}} = 314 \cdot 0,250^2 \cdot 1,4 = 29,47$ м, а отношение

$$\frac{L'_{\text{ж}}}{L_{\text{м}}} = \frac{29,47}{30,305} = 0,9 \leq 0,9,$$

то есть условие выполняется.

12.5 Параметры качания кристаллизатора

К параметрам качания кристаллизатора относятся амплитуда и частота качания, а также закон качания. Для расчета принимаем синусоидальный закон качания кристаллизатора, для которого критерий оптимального опережения $K_{\text{опт}} = 0,274$. Тогда при времени опережения ($\tau_{\text{оп}}$) составляющем 0,2 с, частота качания кристаллизатора составляет

$$\nu = \frac{K_{\text{опт}}}{\tau_{\text{оп}}} \cdot 60 = \frac{0,274}{0,2} \cdot 60 = 82,2 \text{ мин}^{-1}.$$

Оптимальную амплитуду качания рассчитываем для максимальной скорости вытягивания заготовки (1,4 м/мин) с учетом $\tau_{\text{оп}}$ по уравнению (13):

$$\delta = 14,8 \cdot v_{\text{max}} \cdot \tau_{\text{оп}} = 14,8 \cdot 1,4 \cdot 0,2 = 3,98 \text{ мм}.$$

Принимаем амплитуду качания кристаллизатора $\delta = 4 \text{ мм}$.

Необходимую частоту качания кристаллизатора можно также определить исходя из рабочей скорости вытягивания и амплитуды качания по уравнению

$$\nu = k_{\nu} \cdot \frac{v_p}{\delta} \cdot 10^3 = 0,5 \cdot \frac{1,085}{4} \cdot 10^3 = 135,6 \text{ мин}^{-1},$$

где k_{ν} – коэффициент частоты (Принимаем $k_{\nu} = 0,5$).

Принимаем частоту качания кристаллизатора $\nu = 100 \text{ мин}^{-1}$.

12.6 Скорость разливки и диаметр каналов сталеразливочных стаканов

Определение рабочей скорости вытягивания заготовки и диапазон допустимых ее значений позволяет рассчитать рабочую скорость разливки и возможный диапазон ее изменения. Зависимость между скоростью вытягивания заготовки и соответствующей ей скоростью разливки (для одного ручья) описывается формулой (15).

Для расчета скорости разливки требуется определение плотности затвердевшей стали в конце зоны вторичного охлаждения, которая вычисляется по уравнению (16). Приняв плотность стали 17Г1С при 0 °С равной $\gamma_0 = 7,85 \text{ т/м}^3$, коэффициент линейного расширения твердой стали $\alpha = 1,45 \cdot 10^{-5} \text{ 1/град}$ и температуру затвердевшей стали в конце зоны вторичного охлаждения $t_{\text{кЗВО}} = 950 \text{ °С}$, определяем плотности затвердевшей стали в конце зоны вторичного охлаждения

$$\rho_{\text{ст}} = \frac{\rho_0}{1 + 3 \cdot \alpha \cdot t_{\text{кЗВО}}} = \frac{7,85}{1 + 3 \cdot 1,45 \cdot 10^{-5} \cdot 950} = 7,54 \text{ т/м}^3.$$

Тогда, для рассматриваемого примера для заготовки сечением 250 × 700 мм скорость разливки металла на двухручьевой МНЛЗ составит

– при рабочей скорости вытягивания 1,085 м/мин

$$q_p = 7,54 \cdot 0,25 \cdot 0,7 \cdot 1,085 \cdot 2 = 2,87 \text{ т/мин};$$

– при минимальной скорости вытягивания 0,54 м/мин

$$q_{\text{мин}} = 7,54 \cdot 0,25 \cdot 0,7 \cdot 0,54 \cdot 2 = 1,42 \text{ т/мин};$$

– при максимальной скорости вытягивания 1,4 м/мин

$$q_{\text{макс}} = 7,54 \cdot 0,25 \cdot 0,7 \cdot 1,4 \cdot 2 = 3,69 \text{ т/мин}.$$

Расчет диаметров каналов стаканов и в сталеразливочном, и в промежуточном ковшах ведем на максимальную скорость разливки с учетом количества ручьев МНЛЗ.

При расчете диаметра канала для сталеразливочного ковша принимаем $k_p = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ т/(мин} \cdot \text{мм}^2 \cdot \text{м}^{1/2})$ и $h = 0,7 \text{ м}$.

При расчете диаметра канала для промежуточного ковша принимаем $k_p = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ т}/(\text{мин} \cdot \text{мм}^2 \cdot \text{м}^{1/2})$ и $h = 0,7 \text{ м}$.

Диаметр стакана в сталеразливочном ковше, при максимальной скорости разливки на МНЛЗ 3,69 т/мин составит

$$d = \sqrt{\frac{q_p}{k_p \cdot \sqrt{h}}} = \sqrt{\frac{3,69}{1,1 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{0,7}}} = 50,75 \text{ мм}.$$

Принимаем диаметр стакана стальной ковша в большую сторону (кратно 5 мм) – 55 мм.

Диаметра канала стакана промежуточного ковша при максимальной скорости разливки через один ручей, равной $3,69/2 = 1,85 \text{ т}/\text{мин}$, составит

$$d = \sqrt{\frac{q_p}{k_p \cdot \sqrt{h}}} = \sqrt{\frac{1,85}{1,1 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{0,7}}} = 26,51 \text{ мм}.$$

Принимаем диаметр стакана промежуточного ковша в большую сторону (кратно 5 мм) – 30 мм.

12.7 Параметры настройки кристаллизатора и системы вторичного охлаждения

Заданные в исходных данных размеры заготовки ($250 \times 700 \text{ мм}$) характеризуют такие размеры поперечного сечения непрерывно-литой заготовки, которые она должна иметь на выходе из МНЛЗ.

Кристаллизующаяся заготовка имеет несколько большие размеры поперечного сечения, которые постепенно уменьшаются по мере ее охлаждения. Поэтому поддерживающая система машины настраивается таким образом, чтобы расстояние между противоположными стенками кристаллизатора и противоположными роликами системы вторичного охлаждения монотонно уменьшалось в направлении вытягивания заготовки.

Расчет параметров настройки МНЛЗ заключается в определении расстояний между противоположными стенками сверху и внизу кристаллизатора и между противоположными роликами на входе и выходе каждой зоны системы вторичного охлаждения.

Принимаем, что ширина поперечного сечения заготовки превышает заданные размеры в верхней части кристаллизатора на 2,5 %, а толщина – на 4,5 %. В нижней части кристаллизатора превышение размеров по ширине и толщине принимаем равными 1,5 и 3,5 %, соответственно.

Тогда, для заготовки сечением $250 \times 700 \text{ мм}$, расстояние между противоположными стенками сверху и внизу кристаллизатора составит:

$$A_{\text{кр}}^{\text{верх}} = 1,045 \cdot a = 1,045 \cdot 250 = 261,25 \text{ мм};$$

$$B_{\text{кр}}^{\text{верх}} = 1,025 \cdot b = 1,025 \cdot 700 = 717,5 \text{ мм};$$

$$A_{\text{кр}}^{\text{низ}} = 1,035 \cdot a = 1,035 \cdot 250 = 258,75 \text{ мм};$$

$$B_{\text{кр}}^{\text{низ}} = 1,025 \cdot b = 1,015 \cdot 700 = 710,5 \text{ мм}.$$

Изменение толщины и ширины заготовки от низа кристаллизатора до конца зоны вторичного охлаждения (ΔA и ΔB) составляют:

$$\Delta A = A_{\text{кр}}^{\text{низ}} - a = 258,75 - 250 = 8,75 \text{ мм};$$

$$\Delta B = B_{\text{кр}}^{\text{низ}} - b = 710,5 - 700 = 10,5 \text{ мм}.$$

Исходя из количества зон вторичного охлаждения и их протяженности (см. таблицу 9), определяем расстояния между противоположными опорными роликами на входе и выходе каждой зоны системы вторичного охлаждения.

Расчет первой зоны («подбой»)

Расстояние между стенками внизу кристаллизатора и расстояние между противоположными роликами на входе в первую зону вторичного охлаждения одинаковое, то есть

$$A_1^{\text{вход}} = A_{\text{кр}}^{\text{низ}} = 258,75 \text{ мм};$$

$$B_1^{\text{вход}} = B_{\text{кр}}^{\text{низ}} = 710,5 \text{ мм}$$

Расстояние между роликами на выходе из первой зоны вторичного охлаждения определяем из уравнения (20):

$$A_1^{\text{выход}} = A_1^{\text{вход}} - \Delta A \cdot \frac{L_{\text{зво}}^{\text{выход}}}{L_{\text{зво}}} = 258,75 - 8,75 \cdot \frac{0,2}{28,981} = 258,69 \text{ мм};$$

$$B_1^{\text{выход}} = B_1^{\text{вход}} - \Delta B \cdot \frac{L_{\text{зво}}^{\text{выход}}}{L_{\text{зво}}} = 710,5 - 10,5 \cdot \frac{0,2}{28,981} = 710,43 \text{ мм}.$$

где 0,2 – протяженность первой зоны вторичного охлаждения, м;

28,981 – общая протяженность зоны вторичного охлаждения МНЛЗ, м.

Расчет второй зоны (секция «0»)

Расстояние между противоположными роликами на входе во вторую зону вторичного охлаждения равно расстоянию между роликами на выходе из первой зоны, то есть

$$A_2^{\text{вход}} = A_1^{\text{выход}} = 258,69 \text{ мм};$$

$$B_2^{\text{вход}} = B_1^{\text{выход}} = 710,43 \text{ мм}.$$

Расстояние между роликами на выходе из второй зоны вторичного охлаждения определяем из уравнения (20):

$$A_2^{\text{ВЫХОД}} = A_1^{\text{ВХОД}} - \Delta A \cdot \frac{L_{2\text{ЗВО}}^{\text{ВЫХОД}}}{L_{3\text{ВО}}} = 258,75 - 8,75 \cdot \frac{0,2 + 1,21}{28,981} = 258,32 \text{ мм};$$

$$B_2^{\text{ВЫХОД}} = B_1^{\text{ВХОД}} - \Delta B \cdot \frac{L_{2\text{ЗВО}}^{\text{ВЫХОД}}}{L_{3\text{ВО}}} = 710,5 - 10,5 \cdot \frac{0,2 + 1,21}{28,981} = 709,99 \text{ мм}.$$

где $(0,2 + 1,21)$ – протяженность первой и второй зон вторичного охлаждения, м.

Аналогично определяются параметры настройки роликовой проводки в других зонах вторичного охлаждения. Результаты расчетов приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Результаты расчетов параметров настройки ЗВО слябовой МНЛЗ

Номер зоны	Расстояние между противоположными опорными поверхностями на входе в зону, мм		Расстояние между противоположными опорными поверхностями на выходе из зоны, мм	
	По толщине	По ширине	По толщине	По ширине
Кристаллизатор	261,25	717,50	258,75	710,50
1 зона	258,75	710,50	258,69	710,43
2 зона	258,69	710,43	258,32	709,99
3 зона	258,32	709,99	257,69	709,23
4 зона	257,69	709,23	256,32	707,58
5 зона	256,32	707,58	254,88	705,86
6 зона	254,88	705,86	252,72	703,27
7 зона	252,72	703,27	250,00	700,00

Из расчета видно, что расстояние между противоположными стенками кристаллизатора и противоположными роликами системы вторичного охлаждения монотонно уменьшается в направлении движения заготовки.

12.8 Охлаждение кристаллизатора

Для обеспечения высокой эффективности теплоотвода применяют кристаллизаторы с водяным охлаждением.

Охлаждающая вода проходит между пластинами и плитой (толщина каналов 5 мм) или в каналах, высверленных с шагом 45 мм непосредственно в толстых медных пластинах (диаметр каналов 20 мм, расстояние до рабочей поверхности 15 – 20 мм). Длина кристаллизатора в рассматриваемом примере составляет 900 мм.

Для анализа тепловой работы кристаллизатора необходимо рассчитать расход охлаждающей воды, скорости ее движения в каналах рабочих стенок кристаллизатора, а также определить температуру поверхности слитка и толщину твердой корочки на выходе из кристаллизатора.

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:

- 1) температура воды на выходе из кристаллизатора не должна превышать 40 – 45 °С для предотвращения отложения солей. Принимаем 40 °С;
- 2) скорость циркуляции воды должна быть не менее 5 м/с для предотвращения образования застойных зон с локальным перегревом. Принимаем 7 м/с.

Расход воды, обеспечивающий выполнение первого условия.

Принимаем следующие исходные данные:

- температура воды на входе в кристаллизатор 20 °С;
- перепад температур воды в кристаллизаторе $\Delta t_v = 40 - 20 = 20$ °С;
- средний перепад температуры между температурой жидкого металла и температурой поверхности кристаллизующейся заготовки $\Delta t = 380$ °С.

Рассчитываем среднюю толщину слоя затвердевшего металла в кристаллизаторе ξ_k при рабочей скорости вытягивания по уравнению (21):

$$\xi_k = k \cdot \sqrt{\frac{H_{кр} - h_{недолив}}{2 \cdot K_{\phi} \cdot v_p}} = 25 \cdot \sqrt{\frac{0,9 - 0,1}{2 \cdot 1 \cdot 1,085}} = 15,18 \text{ мм.}$$

Принимаем значение коэффициента теплопроводности для низколегированной стали $\lambda = 27$ Вт/(м·К) и определяем среднюю плотность теплового потока от заготовки к кристаллизатору по уравнению (22)

$$Q = \lambda \cdot \frac{\Delta t}{\xi_k} = 27 \cdot \frac{380}{0,001 \cdot 15,18} = 675889,3 \text{ Вт/м}^2.$$

Вычисление расхода воды, обеспечивающего принятую температуру ее на выходе из кристаллизатора, проводится по уравнению (23). Предварительно на основании имеющихся рекомендаций принимаются значения плотности воды $\rho_v = 1000$ кг/м³ и удельной теплоемкости воды $C_v = 4178$ Дж/(кг·К). а также определяется площадь поверхности кристаллизатора (м²), воспринимающая тепловой поток

$$F_{кр} = (A_{кр}^{верх} + A_{кр}^{низ} + B_{кр}^{верх} + B_{кр}^{низ}) \cdot H_{кр} = (0,261 + 0,259 + 0,718 + 0,711) \cdot 0,9 = 1,753 \text{ м}^2.$$

Тогда, при перепаде температур воды в кристаллизаторе $\Delta t_v = 20$ °С, расход воды, обеспечивающий принятую температуру ее на выходе из кристаллизатора, составит

$$G_{кр} = \frac{3600 \cdot Q \cdot F_{кр}}{\rho_v \cdot C_v \cdot \Delta t_v} = \frac{3600 \cdot 675889,3 \cdot 1,753}{1000 \cdot 4178 \cdot 20} = 51,05 \text{ м}^3 / \text{ч.}$$

Расход воды, обеспечивающий выполнение второго условия – заданную скорость ее движения в каналах кристаллизатора, определяется по формуле (25). Предварительно принимаем диаметр каналов $d = 0,02$ м, расстояние между каналами $h = 0,04$ м, толщину стенки кристаллизатора $L_{кр} = 0,06$ м, а также определяем средний периметр кристаллизатора

$$\begin{aligned} P_{кр} &= A_{кр}^{верх} + A_{кр}^{низ} + B_{кр}^{верх} + B_{кр}^{низ} + 2 \cdot L_{кр} = \\ &= 0,261 + 0,259 + 0,718 + 0,711 + 2 \cdot 0,06 = 2,068 \text{ м.} \end{aligned}$$

Тогда количество каналов по периметру кристаллизатора составит

$$m = \frac{P_{кр}}{d + h} + 1 = \frac{2,068}{0,02 + 0,04} + 1 = 35,46 \text{ шт.}$$

Принимаем $m = 36$ шт.

С учетом выполненных предварительных расчетов, расход воды, обеспечивающий заданную скорость движения воды в каналах кристаллизатора (7 м/с), составит

$$G'_{кр} = 900 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot v_v \cdot m = 900 \cdot 3,14 \cdot 0,02^2 \cdot 7 \cdot 36 = 285 \text{ м}^3 / \text{час.}$$

После вычисления требуемого расхода воды, исходя из первого и второго условия, принимается больший из них, то есть 285 м³/час.

12.9 Вторичное охлаждение заготовки

В рассматриваемом примере ЗВО состоит из семи зон, протяженность которых приведена в таблице 9. Для расчета вторичного охлаждения принимаем водяную систему охлаждения зон № 1 и 2, и водовоздушную систему охлаждения зон № 3-7. Такая конструкция ЗВО реализована и на МНЛЗ №2 ОАО «Уральская Сталь».

Режим вторичного охлаждения НЛЗ должен быть таким, чтобы выдерживался оптимальный температурный режим затвердевшей оболочки. Расчет режима вторичного охлаждения заготовки ведется по зонам в соответствии с конструкцией МНЛЗ при рабочей скорости вытягивания (v_p). Так как по длине любой зоны вторичного охлаждения все показатели, характеризующие тепловое состояние кристаллизующейся заготовки, непрерывно меняются, то расчет ведется для середины зоны.

Температура поверхности заготовки в конце зоны вторичного охлаждения ($t_{кЗВО}$) была принята в п. 12.6 и составляет 950 °С.

Приняв значение температурного коэффициента в формуле (27) равным $k_t = 190$ град/мин, определяем температуру поверхности заготовки на выходе из кристаллизатора (в начале зоны вторичного охлаждения) при рабочей скорости вытягивания:

$$t_{нач} = 1509 - \left(70 + 190 \cdot \frac{0,9 - 0,1}{1,085} \right) = 1298,9 \text{ °С.}$$

Установив температуру в начале и в конце зоны вторичного охлаждения, выполняем расчет режима вторичного охлаждения по каждой зоне.

Расчет охлаждения первой зоны вторичного охлаждения («подбой»).

1 Определяется время затвердевания металла в середине первой секции (длина 0,2 м) при рабочей скорости разлива (1,085 м/мин) из выражения

$$\tau_3^1 = \frac{L_1}{v_p} = \frac{0,9 - 0,1 + 0,2 / 2}{1,085} = 0,83 \text{ мин,}$$

где 0,9; 0,1; 0,2 – длина кристаллизатора, уровень недолива и длина первой зоны вторичного охлаждения, соответственно, м.

2 Определяется толщина слоя затвердевшего металла в середине первой зоны вторичного охлаждения:

$$\xi_1 = k \cdot \sqrt{\frac{\tau_3^1}{K_\phi}} = 25 \cdot \sqrt{\frac{0,83}{1}} = 22,77 \text{ мм.}$$

3 Рассчитывается температура поверхности заготовки в середине первой зоны вторичного охлаждения:

$$t_{\text{пов1}} = t_{\text{нач}} - (t_{\text{нач}} - t_{\text{кЗВО}}) \cdot \left(\frac{L_{13\text{ВО}}^{\text{ср}}}{L_{3\text{ВО}}} \right)^{1/5} =$$

$$= 1298,9 - (1298,9 - 950) \cdot \left(\frac{0,2/2}{29,981} \right)^{1/5} = 1187,4 \text{ }^\circ\text{C.}$$

4 Подсчитывается плотность теплового потока.

4.1 При перепаде температуры по толщине затвердевшего слоя $\Delta t_1 = t_{\text{ликв}} - t_{\text{пов1}}$ равном $1509 - 1187,4 = 321,6 \text{ }^\circ\text{C}$, плотность теплового потока от жидкой сердцевины к поверхности заготовки через слой затвердевшего металла $Q_{\text{вн}}$ (Вт/м^2) составит

$$Q_{\text{вн}} = \lambda \cdot \frac{\Delta t_1}{\xi_1} = 27 \cdot \frac{321,6}{0,001 \cdot 22,77} = 381369,5 \text{ Вт/м}^2.$$

4.2 Приняв степень черноты поверхности заготовки $\varepsilon = 0,75$ и температуру окружающей среды $t_{\text{окр}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, а также учитывая значение коэффициент излучения абсолютно черного тела (C_0), равное $5,67 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$, определяем плотность теплового потока с поверхности заготовки в окружающую среду излучением по уравнению (33):

$$Q_{\text{изл}} = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left[\left(\frac{t_{\text{пов1}} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{\text{окр}} + 273}{100} \right)^4 \right] =$$

$$= 0,75 \cdot 5,67 \cdot \left[\left(\frac{1187,4 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{25 + 273}{100} \right)^4 \right] = 193093 \text{ Вт/м}^2.$$

4.3 Плотность конвективного теплового потока с поверхности заготовки в первой зоне, оснащенной струйным охлаждением ($v_{\text{об}} = 0 \text{ м/с}$), при коэффициенте конвективной теплоотдачи $\alpha_{\text{конв}} = 6,16 + 4,18 \cdot v_{\text{об}} = 6,16 + 4,18 \cdot 0 = 6,16 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{град)}$, определяем по уравнению (34):

$$Q_{\text{конв}} = \alpha_{\text{конв}} \cdot (t_{\text{пов1}} - t_{\text{окр}}) = 6,16 \cdot (1187,4 - 25) = 7160,33 \text{ Вт/м}^2.$$

5 Вычисляем плотность орошения поверхности заготовки водой ($g_{\text{ор}}$). Предварительно принимаем охлаждающий эффект воды при водяном вторичном охлаждении первой зоны $\eta = 50000 \text{ Вт} \cdot \text{ч/м}^3$, тогда

$$g_{\text{ор}} = \frac{Q_{\text{вн}} - Q_{\text{изл}} - Q_{\text{конв}}}{\eta} = \frac{381369,5 - 193093 - 7160,33}{50000} = 3,622 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{ч}).$$

6 Рассчитываем расход воды в первой зоне вторичного охлаждения. Предварительно определяем площадь орошаемой поверхности. В соответствии с рекомендациями по организации вторичного охлаждения по условиям расчета отношение сторон НЛЗ $b/a = 2,8$, что больше $1,5$. Поэтому принимаем, что принудительно охлаждаются только широкие грани НЛЗ, а площадь орошаемой поверхности определяется по

формуле (38)

$$F_{\text{оп1}} = 2 \cdot (B_1 - 2 \cdot \xi_1) \cdot L_{\text{ЗВО}} = 0,001 \cdot 2 \cdot \left(\frac{710,5 + 710,43}{2} - 2 \cdot 22,77 \right) \cdot 0,2 = 0,266 \text{ м}^2,$$

где 710,5 и 710,43 – ширина НЛЗ на входе и выходе первой зоны вторичного охлаждения (см. таблицу 11), мм.

Тогда расход воды на первую зону вторичного охлаждения составит

$$G_{\text{вода}} = g_{\text{ор}} \cdot F_{\text{ор}} = 3,622 \cdot 0,266 = 0,963 \text{ м}^3 / \text{ч}.$$

Поскольку первая зона вторичного охлаждения имеет водяную систему охлаждения, то расход воздуха на охлаждение не определяется.

Аналогично рассчитаны параметры вторичного охлаждения для остальных зон. При расчете вторичного охлаждения в зонах 3 – 7, оснащенных водовоздушными форсунками, приняты следующие величины, относящиеся к параметрам воздуха, участвующего в распылении воды:

- скорость движения потока воздуха, подаваемого на заготовку $v_{\text{об}} = 4 \text{ м/с}$;
- охлаждающий эффект воды при водовоздушном вторичном охлаждении $\eta = 58500 \text{ Вт} \cdot \text{ч/м}^3$;
- соотношение расхода воды к расходу воздуха ($G_{\text{вода}}/G_{\text{возд}}$) принято равным 1:100.

Результаты расчетов сведены в таблицу 12.

Таблица 12 – Результаты расчета зоны вторичного охлаждения

Параметр	Значения параметров ЗВО (для середины зоны)						
	1	2	3	4	5	6	7
Охлаждающая среда	вода	вода	вода + воздух				
τ_z , мин	0,83	1,48	3,00	6,07	10,36	15,84	23,29
ξ , мм	22,8	30,4	43,3	61,6	80,5	99,5	120,6
$t_{\text{пов}}$, °С	1187,4	1129,7	1087,3	1047,8	1016,4	989,7	963,9
Δt , °С	321,6	379,3	421,7	461,2	492,6	519,3	545,1
$\alpha_{\text{конв}}$, Вт/(м ² · град)	6,16	6,16	22,88	22,88	22,88	22,88	22,88
$Q_{\text{вн}}$, Вт/м ²	381369,5	336837,0	262743,4	202170,8	165313,5	140916,2	121991,6
$Q_{\text{изл}}$, Вт/м ²	193093,2	164277,9	145272,6	129095,2	117199,0	107773,0	99199,2
$Q_{\text{конв}}$, Вт/м ²	7160,3	6804,8	24305,5	23402,4	22682,7	22072,6	21481,9
$g_{\text{ор}}$, м ³ /(м ² · ч)	3,622	3,315	1,593	0,849	0,435	0,189	0,022
$F_{\text{ор}}$, м ²	0,27	1,57	2,62	5,33	5,19	7,22	8,31
$G_{\text{воды}}$, м ³ /ч	0,963	5,210	4,167	4,522	2,257	1,366	0,186
$G_{\text{воды}}$, л/мин	16,06	86,83	69,45	75,37	37,62	22,77	3,10
$G_{\text{вода}}/G_{\text{возд}}$	-	-	1:100	1:100	1:100	1:100	1:100
$G_{\text{воздуха}}$, м ³ /ч	0,00	0,00	416,67	452,20	225,70	136,62	18,61

На основе данных таблицы 12 строим графики зависимостей толщины корочки (ξ) по длине ЗВО (рисунок 2) и расходов охладителя по зонам вторичного охлаждения (рисунок 3).

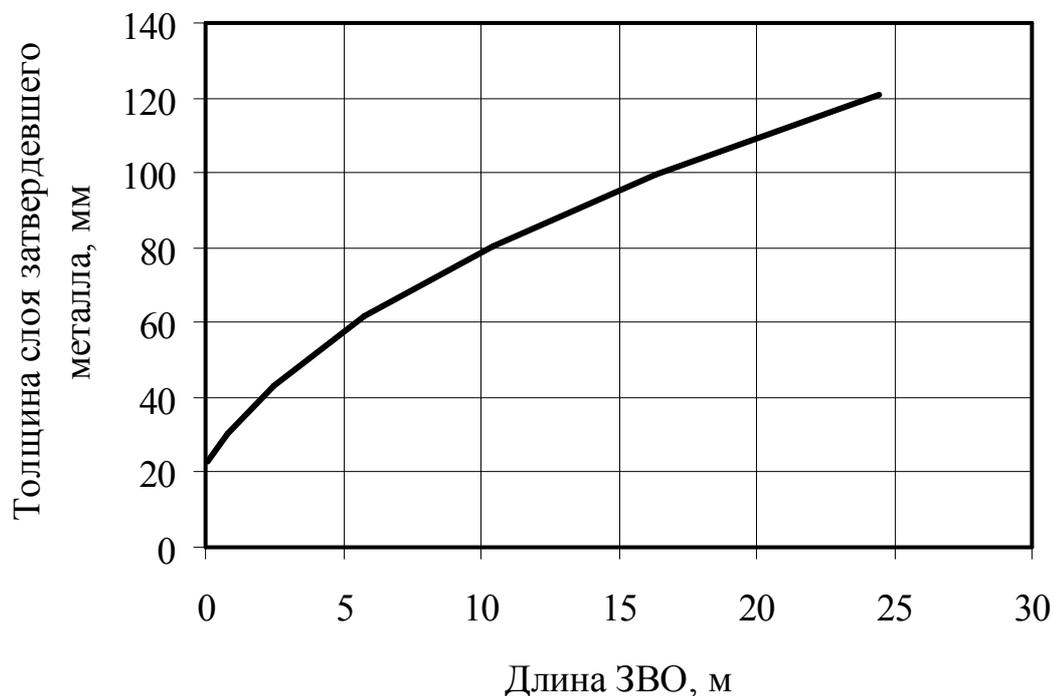


Рисунок 2 – Динамика затвердевания заготовки в зоне вторичного охлаждения

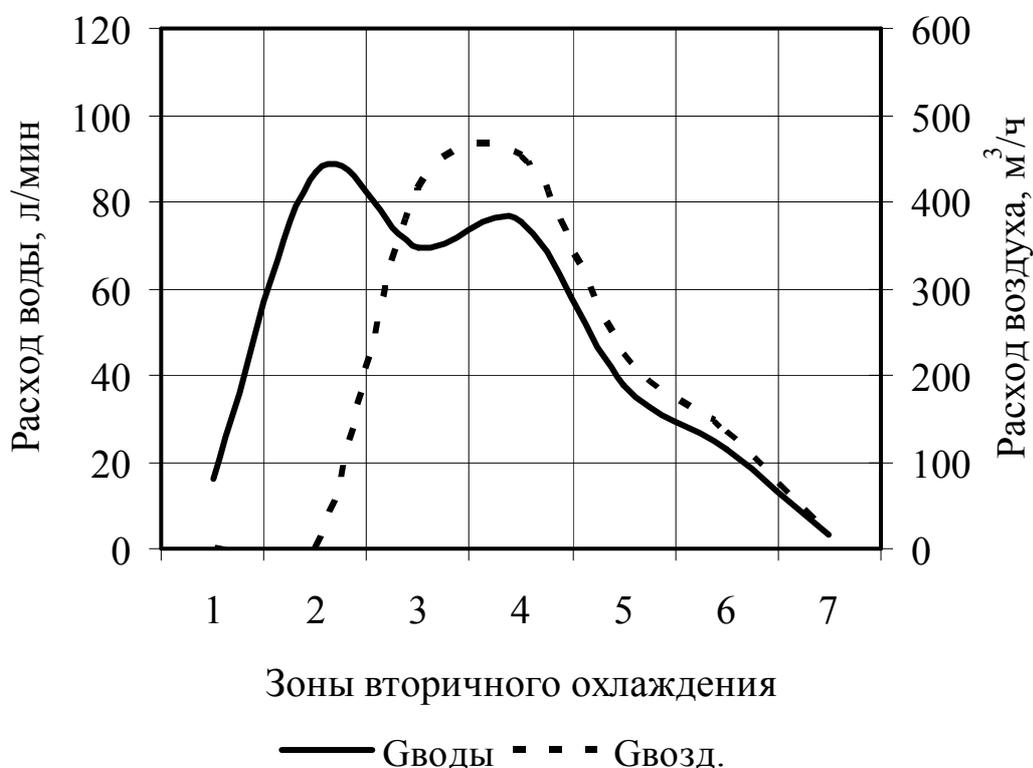


Рисунок 3 – Изменение расхода охладителя по зонам вторичного охлаждения

После определения расхода охладителя по всем зонам подсчитываем общий и удельный расходы воды и воздуха на вторичное охлаждение (на один ручей при рабочей скорости разливки, равной $2,87/2 = 1,44$ т/мин) по уравнению (41):

$$G_{\text{ВТ}}^{\text{вода}} = \sum_{i=1}^n G_i = (0,963 + 5,21 + 4,167 + 4,522 + 2,257 + 1,366 + 0,186) = 18,67 \text{ м}^3 / \text{ч};$$

$$G_{\text{уд}}^{\text{вода}} = \frac{G_{\text{ВТ}}}{60 \cdot q} = \frac{18,67}{60 \cdot 1,44} = 0,217 \text{ м}^3 / \text{т}.$$

$$G_{\text{ВТ}}^{\text{воздух}} = \sum_{i=1}^n G_i = (416,67 + 452,2 + 225,7 + 136,62 + 18,61) = 1249,81 \text{ м}^3 / \text{ч};$$

$$G_{\text{уд}}^{\text{воздух}} = \frac{G_{\text{ВТ}}}{60 \cdot q} = \frac{1249,81}{60 \cdot 1,44} = 14,49 \text{ м}^3 / \text{т}.$$

Поскольку расчет ведется на двухручьевую МНЛЗ, то суммарные расходы охладителя удваиваются и составляют: $37,34 \text{ м}^3/\text{ч}$ и $0,43 \text{ м}^3/\text{т}$ для воды; $2499,62 \text{ м}^3/\text{ч}$ и $28,98 \text{ м}^3/\text{т}$ для воздуха.

12.10 Длительность разливки плавки и производительность МНЛЗ

Определяем машинное время разливки при рабочей скорости вытягивания ($1,085$ м/мин) и массе плавки 240 т по уравнению (42)

$$\tau_{\text{м}} = \frac{M}{N \cdot \rho_{\text{ст}} \cdot F \cdot v_p} = \frac{240}{2 \cdot 7,54 \cdot 0,25 \cdot 0,7 \cdot 1,085} = 83 \text{ мин}.$$

Для определения годовой производительности МНЛЗ предварительно принимаем значения следующих величин:

- доля плавков, разливаемых сериями методом «плавка на плавку» $Z = 80 \%$;
- 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;
- среднее количество плавков в одной серии для слябовой МНЛЗ $S = 8$ шт;
- фактическое время разливки (число рабочих суток МНЛЗ в году) для слябовой МНЛЗ $D = 291$ сут.

Тогда, по уравнению (43) годовая производительность двухручьевой слябовой МНЛЗ составит

$$\begin{aligned} \Pi &= M \cdot \frac{1440}{1,15 \cdot Z \cdot \left(\tau_{\text{м}} + \frac{\tau_{\text{пс}}}{S} \right) + 1,15 \cdot (100 - Z) \cdot (\tau_{\text{м}} + \tau_{\text{п}})} \cdot g_r \cdot D = \\ &= 240 \cdot \frac{1440}{1,15 \cdot 80 \cdot \left(83 + \frac{160}{8} \right) + 1,15 \cdot (100 - 80) \cdot (83 + 55)} \cdot 95 \cdot 291 = 755265,8 \text{ т/год}. \end{aligned}$$

С целью выполнения неравенства (44) при допустимой продолжительности разливки плавки массой 240 т - $\tau_p^g = 98$ минут и расчетной продолжительности разливки $\tau_m = 83$ мин, принимаем фактическую длительность разливки τ_ϕ , равную 90 минут. В этом случае неравенство (44) выполняется:

$$\tau_p^g > \tau_\phi > \tau_m;$$

$$98 > \tau_\phi > 83;$$

$$98 > 90 > 83.$$

Принятое фактическое время разливки удовлетворяет требованиям по допустимой продолжительности разливки плавки, поэтому выбор двухручьевого МНЛЗ для разливки слябовой заготовки сечением 250 × 700 мм осуществлен правильно.

12.11 Определение требуемого числа МНЛЗ

Определяем число постоянно работающих машин (M_p) по уравнению (45):

$$M_p = \frac{\Sigma\Pi}{\Pi} = \frac{600000}{755265,8} = 0,79.$$

В соответствии с рекомендациями принимаем число постоянно работающих машин (M_p), равное 1 шт.

12.12 Заключение

В работе для разливки стали 17Г1С на заготовку сечением 250 × 700 мм была выбрана двухручьева сортовая МНЛЗ с конструктивными параметрами, приведенными в таблице 9, а также определены наиболее важные технологические параметры, характеризующие процесс непрерывной разливки стали:

- 1) рабочая скорость вытягивания заготовки $v_p = 1,085$ м/мин и диапазон скоростей вытягивания заготовки: $v_{\text{мин}} = 0,54$ м/мин и $v_{\text{макс}} = 1,4$ м/мин;
- 2) расход воды на охлаждение кристаллизатора - 285 м³/час;
- 3) удельный расход воды на ЗВО – 37,34 м³/ч и 0,43 м³/т;
- 4) удельный расход воздуха на ЗВО – 2499,62 м³/ч и 28,98 м³/т;
- 5) средняя продолжительность разливки плавки – 90 мин;
- 6) годовая производительность МНЛЗ - 0,76 млн. т;
- 7) Количество двухручьевых слябовых МНЛЗ – 1.

13 Оформление пояснительной записки

Пояснительная записка оформляется на листах формата А4 с отступами сверху, слева и снизу – 20 мм, справа – 10 мм. Оформление заголовков, библиографического списка, таблиц и рисунков показано в тексте методических указаний. Пояснительная записка должна состоять из следующих частей:

- 1 Титульный лист;
- 2 Задание на курсовую работу;
- 3 Содержание;
- 4 Введение;
- 5 Краткое описание МНЛЗ;
- 6 Расчет основных параметров МНЛЗ;
- 7 Заключение;
- 8 Список использованных источников.

В разделе «Введение» формулируются основные задачи, решаемые при выполнении курсовой работы. Здесь следует указать те основные технологические параметры, которые необходимо определить, а также их влияние на качество непрерывнолитой заготовки и эффективность работы МНЛЗ.

В разделе «Краткое описание МНЛЗ» должна быть дана общая характеристика машины (тип, количество ручьев, возможные размеры поперечного сечения заготовки, способ вторичного охлаждения, агрегат резки и др.), приводится схема одного из ручьев, а также таблица с данными о зонах вторичного охлаждения.

Раздел «Расчет технологических параметров» выполняется в соответствии с пунктами 1-11 данных методических указаний.

В разделе «Заключение» приводятся наиболее важные технологические параметры, характеризующие процесс непрерывной разливки в целом (диапазон скоростей вытягивания заготовки, расход воды на охлаждение кристаллизатора, удельный расход охладителя на вторичное охлаждение, средняя продолжительность разливки плавки, годовая производительность МНЛЗ и их число).

Библиографический список

- 1 Конструкция и проектирование агрегатов сталеплавильного производства. / В.П. Григорьев, Ю.М. Нечкин, А.В. Егоров, Л.Е. Никольский. – М.: МИСиС, 1995. – 512с.
- 2 Кудрин, В.А. Теория и технология производства стали. – М.: Мир, 2003. – 528 с.
- 3 Технология производства стали в современных конвертерных цехах / Колпаков, С.Ф., Старов, Р.В., Смоктий, В.В. и др. – М.: Metallurgia, 1991. – 464с.
- 4 Емельянов, В.А. Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок. – М.: Metallurgia, 1988. – 143 с.
- 5 Лисиенко, В.Г., Самойлович, Ю.А. Теплотехнические основы технологии и конструирования машин непрерывного литья заготовок. – Красноярск: Изд-во Красноярского ун-та, 1986. – 120 с.
- 6 Столяров, А.М., Селиванов, В.Н. Непрерывная разливка стали. Ч.1. Конструкция и оборудование МНЛЗ: учебное пособие. – Магнитогорск.: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. – 154с.
- 7 Методика расчета производительности машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). – М.: Гипромез, 1976. – 114 с.
- 8 Нормы технологического проектирования и технико-экономические показатели отделений и установок непрерывной разливки стали (ВНТМ 1-5-76). – М.: Гипромез, 1976. – 136 с.
- 9 Сталеплавильное производство. /Справочник, т.1. Под ред. А.М. Самарина – М.: Metallurgia, 1964. – 476 с.
- 10 Литвин, А.В., Мазур, В.Л., Пилюшенко, В.Л. Разработка литейно-прокатных комплексов для производства листовой стал, тонких слябов и лент за рубежом. // Черная металлургия, 1990. - №4. – С.23-31.
- 11 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.
- 12 Масальский С.С., Дертунов Д.А. Расчет затвердевания металла в кристаллизаторе МНЛЗ // Теплотехника и теплоэнергетика в металлургии: Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов. – Магнитогорск: Изд. МГТУ, 2000. – С.5

Приложение А

Варианты заданий на курсовую работу*

№ варианта	Марка стали	Вместимость сталеразлив. ковша, т	Слябовая заготовка		Сортовая заготовка	
			Годовое производство, млн.т	Типоразмер, мм×мм	Годовое производство, млн.т	Типоразмер, мм×мм
1.	10Г2	120	0,5	150 × 700	0,4	200 × 200
2.	40ХС	240	0,4	150 × 1100	0,5	250 × 250
3.	20ХГСА	240	0,2	150 × 900	1,5	300 × 400
4.	25ХГСА	240	0,3	150 × 1900	0,4	150 × 150
5.	30ХГСА	240	0,6	250 × 700	1,2	300 × 450
6.	35ХГСА	120	1,0	250 × 1100	0,9	300 × 300
7.	20Х	120	0,8	250 × 900	0,8	250 × 350
8.	40Х	240	0,7	150 × 1550	1,1	350 × 350
9.	40Г2	240	0,4	250 × 1550	1,0	250 × 300
10.	09Г2	120	0,65	250 × 1900	1,7	250 × 250
11.	12ГС	120	0,25	200 × 1000	0,8	200 × 250
12.	17Г1С	120	0,4	200 × 1900	0,75	200 × 200
13.	17ГС	120	0,9	200 × 1500	0,4	150 × 200
14.	09Г2С	120	0,6	200 × 2200	0,35	150 × 150
15.	10Г2С1	120	1,4	300 × 1000	0,25	120 × 150
16.	35ГС	120	1,0	300 × 1900	0,35	120 × 120
17.	25Г2С	120	0,5	300 × 1500	0,4	80 × 120
18.	20Г	120	1,2	300 × 2200	0,5	80 × 80
19.	40Г	240	1,1	150 × 700	0,9	300 × 450
20.	08	240	1,2	150 × 1100	0,75	300 × 300
21.	20	240	1,0	150 × 900	0,6	250 × 350
22.	40	240	0,9	150 × 1900	0,85	350 × 350
23.	60	240	0,8	250 × 700	0,4	250 × 300
24.	50Г	240	0,9	250 × 1100	0,45	250 × 250
25.	50Х	240	0,4	250 × 900	0,55	200 × 250
26.	35Г2	120	0,6	150 × 1550	0,3	200 × 200
27.	50Г2	120	0,4	200 × 1000	0,3	150 × 200
28.	15Х	120	0,8	200 × 1500	0,4	150 × 150

* в случае, если в задании не указаны конструктивные параметры МНЛЗ, для разливки стали принимаются МНЛЗ, эксплуатируемые в ЭСПЦ ОАО «Уральская Сталь» (Приложение Б, В)

Теплофизические свойства стали, параметры кристаллизатора и другие необходимые данные принимаются самостоятельно по литературным источникам или в соответствии с рекомендациями методических указаний.

Приложение Б

Краткая характеристика МНЛЗ некоторых заводов

Предприятие	Масса плавки, т	Основной сортament	Производительность		Тип МНЛЗ	Кол-во МНЛЗ / кол-во ручьев на одной МНЗЛ	Сечение заготовки, м
			Цеха, т/год	Одной МНЛЗ, т/год			
ЧерМК	100	конструкционная, коррозионно стойкая	0,9	-	вертикальная	2/2	0,175-0,2×1,07-1,35
ММЗ	100	арматурная углеродистая	0,73	0.365	радиальная	2/6	1,125×0,125
ОХМК	100	конструкционная, углеродистая	0,8	0,8	криволинейная	1/4	0,3×0,45, круг 0,43; 0,54; 0,6 м
	100	конструкционная, углеродистая легированная	0,8	0,8	радиальная	1/1	1,2 х (0,19-0,27)
ОЭМК	150	конструкционная, углеродистая, подшипниковая	1,5	0,4	радиальная	4/4	0,3×0,36
БМЗ	100	конструкционная, углеродистая легированная	0,75	0,375	радиальная	2/6	0,125×0,125
			0,3	-	криволинейная	1/4	0,25-0,3×0,3-0,4
Серп и Молот	10	конструкционная	-	-	радиальная	2/1	0,14-0,16×0,14-0,16

Приложение В

Технические характеристики МНЛЗ ОАО «Уральская Сталь»

Блюмовая МНЛЗ № 1			
Наименование параметра	Значение параметра		
	В работе до 2005г.	В работе с 2006г.	
Тип машины	Блюмовая радиальная	Комбинированная криволинейная	
Производительность МНЛЗ, тыс.т/год	800	400-950	
Масса плавки, т	105	120	
Количество ручьев, шт.	4	4	
Базовый радиус / Радиус радиальной части, м	12	12	
Радиус криволинейной части, м	-	R1 = 12,0 м, R2 = 13,8м, R3 = 19,2м, R4 = 37,0 м	
Металлургическая длина от верха кристаллизатора до оси первого ролика МГР, м	19,136	24,78	
Расстояние между ручьями, мм	1700-1700-1700	1700-1700-1700	
Механизм качания кристаллизатора	Механический	Гидравлический резонансный	
Кристаллизатор	Прямой, вертикальный	Радиальный	
- длина, мм	1000	750	
- частота качания, качаний в мин	20 – 100	20 - 300	
- амплитуда качания, мм	5 – 16	1 – 6	
- кривая качания	синусоидальная	-	
- материал плит	Бронза	CuCrZr	
Максимальная скорость вытягивания, м/мин	0,65	0,75 – блюм 0,55 – круг \varnothing 430мм 0,36 – круг \varnothing 540мм 0,28 – круг \varnothing 600мм	
Длина зон ВО, м:	1 зона	0,32	0,24
	2 зона	2,4	1,48
	3 зона	3,6	2,6
	4 зона	4,48	4,45
	5 зона	6,8	6,68
	6 зона	-	9,33
Время подготовки МНЛЗ к работе, мин	60	60	
Время разливки, мин	50	От сечения	
Сечения отливаемых заготовок, мм	300×340 и 300×450	300×450, \varnothing 430, \varnothing 540, \varnothing 600мм	
Мерные длины заготовок, м	3,5 - 6	До 6 м	
Высота разливочной площадки, м	+13,150	+13,150	
Газорезательная машина			
- ширина реза, мм	~ 10	Н.д.	
- скорость резки, мм/мин	330 – 450	Н.д.	

Приложение В – продолжение

Слябовая МНЛЗ № 2		
Наименование параметра	Значение параметра	
Тип машины	Слябовая криволинейная с вертикальным участком	
Масса плавки, т	120	
Емкость промковша, т	25	
Количество ручьев, шт	1	
Радиусы изгиба, м	R1 = 60 – R6 = 11	
Радиусы выпрямления, м	R7 = 10,5 – R10 = 33	
Металлургическая длина, м	30,305	
Количество секций на ручей (включая секцию «0»), шт	17	
Кристаллизатор	Прямой, вертикальный	
- длина, мм	900	
- частота качания, качаний в мин	0 – 300	
- амплитуда качания, мм	1 – 3	
- кривая качания	синусоидальная	
- материал плит	Медь + серебро	
- толщина плит, мм	55	
Длина зон ВО, м:	1 зона – «подбой»	0,2
	2 зона – секция «0»	1,21
	3 зона – секция 1	2,1
	4 зона – секция 2-4	4,55
	5 зона – секция 5-7	4,756
	6 зона – секция 8-11	7,14
	7 зона – секция 12-16	9,025
Максимальная скорость вытягивания заготовки, м/мин	1,6	
Производство, дней/год	323	
Время подготовки МНЛЗ к работе, мин	55	
Время разливки плавки, мин	45 – 55	
Ширина слябов, мм	1200	
Толщина слябов, мм	190, 270	
Длина слябов, м	3,9 – 5,2	
Высота разливочной площадки, м	+12,550	
Газорезательная машина		
- ширина реза, мм	~ 10	
- скорость резки, мм/мин	330 – 450	
Головная и хвостовая обрезь, мм	500	

Приложение Г

Технологические параметры работы МНЛЗ

Марка стали	Сечение кристаллизатора b×a, мм	Температура металла в проковше, К	Рабочая скорость вытягивания, м/мин
Ст3сп	0,125×0,125	1798-1818	1,6-2,0
09Г2С	-/-	1793-1813	-/-
20ГС, 35ГС	-/-	1783-1803	-/-
12Х18Н10Т	0,2-0,75×1-1,35	1773-1803	0,6
ЭЛ-0	-/-	1813-1843	0,5-0,6
Ст3сп	-/-	1813-1833	0,6-0,7
40Х	-/-	1793-1813	0,5-0,6
Ст3сп, 20Х	0,3×0,45	18103-1823	0,45-0,64
35ХГСА, 40Х	-/-	1793-1813	-/-
12ХНЗА	-/-	1803-1843	-/-
Ст20-45	0,14×0,14 0,16×0,16	1793-1813	1,4-1,6 1,2-1,4
Ст70 корд	0,25×0,3	1793-1803	0,6-0,7
Ст50	0,3×0,4	1763-1783	0,7-0,8
ШХ15	0,3×0,36	1753-1768	0,5-0,55

Приложение Д

Характеристики кристаллизаторов МНЛЗ

Предприятие	Тип	Частота, Гц	Амплитуда качания, мм	Конусность, мм широкая / узкая грань	Длина/ уровень металла, м	Расход охлад. воды, м ³ /ч	Примечание
ЧерМК	гладкостенный прямолинейный	0,5-1,5	10	обратная	1,2/0,11	20-25	Сборный, толстостенный
ММЗ	профильный криволинейный	1,6-2,6	10	0/0	0,8/0,06-0,1	60-80	Гильзовый с толщиной стенки 0,006 м
ОХМК	гладкостенный криволинейный	1	10	-	0,8/0,07-0,15	130-160	Сборный, толстостенный
БМЗ		2,5-2,8	10	0/0	0,8/0,075-0,1	130	Гильзовый с толщиной стенки 0,01 м
ОЭМК		0,25-2,5	10	обратная	1/0,1-0,12	150-200	Плиты толщиной 0,05-0,07 м
Серп и Молот	гладкостенный прямолинейный	1,6-2	10	прямая 1,1-1,5/1,1-1,5	0,8/0,1	90-100	Гильзовый с толщиной стенки 0,01-0,014 м
БМЗ		3-4	6	обратная 1-1,25/1,25-1,5	0,7/0,1-0,12	145-215	Плиты толщиной 0,05 м

ШАПОВАЛОВ АЛЕКСЕЙ НИКОЛАЕВИЧ

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ

Методические указания для выполнения
курсовой работы по дисциплине
«Разливка стали и специальная металлургия»
для студентов, обучающихся по направлению
подготовки бакалавров 150400 «Металлургия»,
профиль «Металлургия черных металлов»,
всех форм обучения

Подписано	в	печать	
27.12.2012			
Формат 60x90	$\frac{1}{16}$	Печать офсетная	Уч.-изд.л.3,5
Рег.№ 12		Тираж 50 экз.	

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
Новотроицкий филиал
462359, Оренбургская обл., г. Новотроицк, ул. Фрунзе, 8.
E-mail: nfmisis@yandex.ru
Контактный тел. 8 (3537) 679729.

Отпечатано в типографии ООО «Медиа Сервис»
Оренбургская обл., г.Орск, ул.Краматорская, 2б

Контактный тел. 8 (3537) 236161.