

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Металлургия стали и сплавов»

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к расчетной работе по курсу «Современные процессы разливки металлов»  
на тему «Расчёт основных конструктивных и технологических параметров

МНЛЗ криволинейного типа»

(для студентов направления подготовки 22.04.02 «Металлургия»,  
магистерской программы «Металлургия стали»)

Донецк, 2018

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Металлургия стали и сплавов»

### **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к расчетной работе по курсу «Современные процессы разливки металлов»  
на тему «Расчёт основных конструктивных и технологических параметров

МНЛЗ криволинейного типа»

(для студентов направления подготовки 22.04.02 «Металлургия»,  
магистерской программы «Металлургия стали»)

Рассмотрено на заседании  
кафедры «Металлургия стали  
и сплавов».

Протокол № 9 от 28.03.2018 г.

Донецк, 2018



## Исходные данные:

### Индивидуальные исходные данные

Годовая производительность ДСП по жидкому металлу, т

$$P_{\text{ДСП}} := 1000000$$

Масса плавки в стальковше, т

$$M := 120$$

Основной сортament разливаемого на МНЛЗ металла

Низкоуглеродистая конструкционная сталь

Тип и размеры (м) заготовки, получаемой на МНЛЗ

Варианты:

- Сорт. Задана сторона квадрата  $a=b$ , м;
- Блюм. Заданы две стороны  $a$  (ширина) и  $b$  (толщина), м;
- Сляб. Заданы две стороны  $a$  (ширина) и  $b$  (толщина), м.  $a \gg b$ ;
- Круг. Задан диаметр  $d=a=b$ , м.

Сляб

$$a := 2.4$$

$$b := 0.2$$

Серийность разливки (число плавков в серии)

$$n_{\text{сер}} := 10$$

Текущие простои МНЛЗ (замена кристаллизатора, секций ЗВО, прорывы и др. аварии), суток в год

$$P_{\text{T}} := 20$$

Расстояние между уровнями металла в промковше и кристаллизаторе, м

$$h := 1.5$$

Температура солидус разливаемой стали, °C

$$t_{\text{с}} := 1498$$

### Общие исходные данные

Плановые простои МНЛЗ, часов в неделю

$$P_{\text{П}} := 8$$

Плановые простои МНЛЗ на капитальный ремонт, суток в год

$$P_{\text{К}} := 10$$

Расходный коэффициент металла при разливке на МНЛЗ

$$k_{\text{МНЛЗ}} := 0.98$$

Время подготовки МНЛЗ к следующей серии плавков, мин

$$\tau_{\text{П}} := 60$$

Коэффициент расхода металла через разливочный стакан стальковша и промковша

$$\mu := 0.85$$

Коэффициент загрузки оборудования [1, стр. 506]

для слябовых машин

$$\phi_1 := 0.9$$

для остальных машин

$$\phi_1 := 0.85^{\square}$$

Плотность жидкой стали, т/м<sup>3</sup>

$$\rho_{жс} := 7.0$$

Средняя плотность стальной заготовки на технологической линии МНЛЗ, т/м<sup>3</sup>

$$\rho_{тс} := 7.6$$

Теплота кристаллизации стали, кДж/кг

$$\lambda_{кр} := 270$$

Теплоемкость затвердевшей корочки стали, кДж/(кгК)

$$C_{тс} := 0.680$$

### 1. Расчет количества рабочих суток МНЛЗ в году

Число рабочих суток МНЛЗ учитывает плановые, капитальные и текущие ремонты

$$N_{раб} := 365 - \left( \frac{52 \cdot \Pi_{п}}{24} + \Pi_{к} + \Pi_{т} \right)$$

$$N_{раб} = 317.667$$

### 2. Ритм выпуска плавов из ДСП

Примем из практических данных число рабочих суток ДСП в году

$$N_{рабДСП} := 320$$

Тогда продолжительность плавки (интервал между выпусками) составит, мин.

$$\tau_{пш} := \frac{1440 \cdot N_{рабДСП} \cdot M}{\Pi_{ДСП}}$$

$$\tau_{пш} = 55.296$$

### 3. Расчет скорости разливки

Скорость разливки (вытягивания)  $v_p$ , м/мин определяется следующей эмпирической зависимостью, в которой коэффициент  $k_m$  должен соответствовать определенной группе марок стали и типу заготовки [2, с. 264].

для слябов

$$k_m := 0.28$$

низкоуглеродистая и низколегированная сталь

$$k_m := 0.22^{\square}$$

среднеуглеродистая, и среднелегированная сталь

высокоуглеродистые и высоколегированные марки стали с повышенными требованиями.

$$k_m := 0.18^{\square}$$

для других типов заготовки: блюм, сорт (a=b), круг (d=a=b)

$$k_m := 0.14^{\square}$$

низкоуглеродистая и низколегированная сталь

$$k_M := 0.11^2$$

высокоуглеродистые и легированные марки стали с повышенными требованиями.

$$u_p := \frac{k_M \cdot \left(1 + \frac{a}{b}\right)}{a}$$

$$u_p := \frac{k_M \cdot (1 + 1)^2}{d}$$

$$u_p = 1.517$$

#### 4. Расчет продолжительности разливки

Длительность процесса разливки ( $\tau_r$ , мин) рассчитывается с учетом серийности разливки ( $n_{сер}$ ), т.е. числом разливок "плавка на плавку" и временем, необходимым для подготовки МНЛЗ к следующей серии плавки ( $\tau_{п}$ , мин) из условия, чтоб производительность МНЛЗ была не ниже производительности печи.

Производительность МНЛЗ определяют следующим соотношением

$$P_{МНЛЗ} = \frac{1440 \cdot M \cdot N_{раб} \cdot n_{сер} \cdot \phi_1}{(\tau_r \cdot n_{сер} + \tau_{п})}$$

Задавшись первым приближением для  $\tau_r$ , исходя из равенства производительности ДСП и МНЛЗ определяют длительность разливки одной плавки как корень уравнения

$$\tau_r := 20$$

$$\text{root} \left[ P_{ДСП} - \left[ \frac{1440 \cdot M \cdot N_{раб} \cdot n_{сер} \cdot \phi_1 \cdot k_{МНЛЗ}}{(\tau_r \cdot n_{сер} + \tau_{п})} \right], \tau_r \right] = 42.415$$

Длительность разливки плавки должна быть меньше длительности плавки ( $\tau_{пн}$ ), что соответствует логистике работы сталеплавильного цеха.

#### 5. Расчет количества ручьев МНЛЗ

Число ручьев определяется массой плавки, необходимой длительностью разливки, площадью сечения заготовки и скоростью вытягивания заготовки. для заготовки прямоугольного сечения

$$N_{руч} := \text{ceil} \left[ \frac{M}{u_p \cdot \rho_{ст} \cdot a \cdot b \cdot \text{root} \left[ P_{ДСП} - \left[ \frac{1440 \cdot M \cdot N_{раб} \cdot n_{сер} \cdot \phi_1}{(\tau_r \cdot n_{сер} + \tau_{п})} \right], \tau_r \right] \cdot k_{МНЛЗ}} \right]$$

$$N_{руч} = 1$$

для заготовки круглого сечения

$$N_{руч} := \text{ceil} \left[ \frac{M}{u_p \cdot \rho_{ст} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \text{root} \left[ P_{ДСП} - \left[ \frac{1440 \cdot M \cdot N_{раб} \cdot n_{сер} \cdot \phi_1}{(\tau_r \cdot n_{сер} + \tau_{п})} \right], \tau_r \right] \cdot k_{МНЛЗ}} \right]$$

Если по расчету требуется более 2 ручьев для слябовой и более 8 ручьев для других типов заготовки, следует, по практическим рекомендациям, установить 2 МНЛЗ.

## 6. Расчет базового радиуса МНЛЗ

На основе опытных данных [1, с.455] допустимый базовый радиус технологической оси криволинейной МНЛЗ ( $R_{\text{МНЛЗ}}$ , м) с учетом скорости разливки, коэффициента затвердевания и прочностных характеристик затвердевающего металла определяется следующей эмпирической зависимостью:

Коэффициент кристаллизации для непрерывной разливки стали  $k_{\text{крист}}$  принимается 24-26 мм/(мин)<sup>0.5</sup> для слябов и 28-30 мм/(мин)<sup>0.5</sup> для остального сортамента [3, с.25]:

$$k_{\text{кр}} := 25$$

$$k_{\text{кр}} := 30$$

Величина допустимой деформации слоев металла в температурном интервале хрупкости,  $m$  [1, с. 455].

для низкоуглеродистой и низколегированной стали

$$\epsilon_{\text{д}} := 0.0065$$

для среднеуглеродистой и среднелегированной стали

$$\epsilon_{\text{д}} := 0.0040$$

для высокоуглеродистой и высоколегированной стали

$$\epsilon_{\text{д}} := 0.0040$$

коэффициент, учитывающий интенсивность охлаждения заготовки в ЗВО [1, с. 455], который изменяется от 0,7 до 0,8

$$\Theta := 0.75$$

$$R_{\text{МНЛЗ}} := \frac{0.39 \cdot (k_{\text{кр}} \cdot 10^{-3})^2 \cdot \Theta^2}{u_{\text{р}} \cdot \epsilon_{\text{д}}^2} \cdot \left[ \sqrt{1 + \frac{1.17 \cdot b \cdot u_{\text{р}} \cdot \epsilon_{\text{д}}}{(k_{\text{кр}} \cdot 10^{-3})^2 \cdot \Theta^2}} - 1 \right]^2$$

$$R_{\text{МНЛЗ}} = 8.751$$

## 7. Расчет длины кристаллизатора

Рассчитывается из условия получения на выходе из кристаллизатора толщины затвердевшей корочки металла не менее 20 мм. Это, по практическим данным, обеспечивает безопасную по прорывам металла под действием гидростатического давления эксплуатацию МНЛЗ.

$$\delta_{\text{кор}} := 20$$

Кинетика кристаллизации описывается уравнением:

$$\delta = k_{\text{кр}} \cdot \sqrt{\tau_{\text{кр}}}$$

Тогда, время необходимое для роста корочки 20 мм, из уравнения кинетики кристаллизации, составит, мин:

$$\tau_{\text{кр}} := \left( \frac{\delta_{\text{кор}}}{k_{\text{кр}}} \right)^2$$

$$\tau_{\text{кр}} = 0.64$$

Приняв коэффициент заполнения кристаллизатора  $k_{\text{зап}} = 0,9$  (учитывает запас по высоте для исключения перелива металла), получим длину кристаллизатора  $L_{\text{кр}}$ , м.

$$k_{\text{зап}} := 0.9$$

$$L_{\text{кр}} := \frac{u_p \cdot \tau_{\text{кр}}}{k_{\text{зап}}}$$

$$L_{\text{кр}} = 1.079$$

## 8. Расчет частоты и амплитуды качания кристаллизатора

Принят синусоидальный закон качания кристаллизатора. По практическим данным время опережения кристаллизатором слитка, достаточное для "залечивания" поверхностных дефектов составляет  $\tau_{\text{оп}} = 0,1-0,3$  с. Руководствуемся эмпирическими зависимостями [1, с. 450] частоты ( фопт, Гц) и амплитуды (Аопт, мм) от времени опережения и скорости разливки ( $u_p$ , м/мин).

$$\tau_{\text{оп}} := 0.2$$

$$f_{\text{опт}} := \frac{0.274}{\tau_{\text{оп}}}$$

$$f_{\text{опт}} \cdot 60 = 82.2$$

$$A_{\text{опт}} := 14.8 \cdot u_p \cdot \tau_{\text{оп}}$$

$$A_{\text{опт}} = 4.489$$

## 9. Расчет диаметра разливочного стакана промковша

Диаметр разливочного стакана промковша ( $d_{\text{рслк}}$ , мм) рассчитывается из условия равенства массы металла, протекающего в единицу времени через канал разливочного стакана промежуточного ковша, и на выходе из ручья. Линейная скорость истечения металла в кристаллизатор является функцией расстояния между уровнями стали в промковше и кристаллизаторе ( $h$ , м).

$$\rho_{\text{жс}} \cdot \mu \cdot \sqrt{2 \cdot 9.81 \cdot h} \cdot \pi \cdot \frac{d_{\text{рслк}}^2}{4} = \rho_{\text{тс}} \cdot \frac{u_p}{60} \cdot (a \cdot b)$$

$$h = 1.5$$

$$d_{\text{рслк}} := \sqrt{\frac{4 \cdot \rho_{\text{тс}} \cdot \frac{u_p}{60} \cdot (a \cdot b)}{\rho_{\text{жс}} \cdot \mu \cdot \sqrt{2 \cdot 9.81 \cdot h} \cdot \pi}} \cdot 1000$$

$$d_{\text{рслк}} = 60.311$$

Принимается стандартная величина диаметра разливочного стакана  $d =$  (большее целое число, кратное 5)

## 10. Расчет металлургической длины МНЛЗ и полного времени кристаллизации

Металлургическая длина МНЛЗ ( $L_{\text{мет}}$ , м) определяется по линии изгиба заготовки от мениска металла в кристаллизаторе до полного затвердевания, продолжительность которого  $t_{\text{пкр}}$ .

Исходя из этого условия:

$$\frac{a}{2} = k_{кр} \cdot \sqrt{\tau_{пкр}} = k_{кр} \cdot \sqrt{\frac{L_{мет}}{u_p}}$$

Вместе с тем, величина  $k_{кр}$ , по данным [2, с.264] снижается при увеличении отношения ширины к толщине заготовки, что может быть представлено следующей зависимостью от  $(b/a)$ :

$$k_{кр1} := \frac{k_{кр}}{\left[\left(\frac{b}{a}\right)^{0.217}\right]^{0.5}}$$

Это имеет определенное значение для сляба, в меньшей степени - для бруса и не имеет значения для сорта и круга ( $k_{кр1} = k_{кр}$ )

Тогда

$$L_{мет} := \frac{\frac{b^2}{4} \cdot u_p}{\left(k_{кр1} \cdot 10^{-3}\right)^2}$$

$$L_{мет} = 14.152$$

Расчет металлургической длины позволяет установить место применения "мягкого обжата" - эффективного метода снижения осевой пористости и ликвации.

Полное время кристаллизации заготовки, мин определяется как

$$\tau_{пкр} := \frac{b^2}{4 \cdot \left(k_{кр1} \cdot 10^{-3}\right)^2}$$

$$\tau_{пкр} = 9.331$$

## 11. Расчет системы охлаждения кристаллизатора МНЛЗ

### 11.1 Тепловой поток, уносимый водой

Тепловой поток от заготовке к воде в кристаллизаторе длиной  $L_{кр}$ , м рассчитывается как сумма:

- теплоты кристаллизации, выделяющейся за время пребывания НЛЗ в кристаллизаторе на  $1m^2$  его поверхности при условии, что на выходе из кристаллизатора формируется корочка стали толщиной не менее 20 мм (чтоб на практике обеспечить безаварийную разливку) ;
- теплового потока конвекции от жидкой лунки к поверхности растущей корочки.

#### 11.1.1 Расчет теплового потока кристаллизации

Масса корочки в кристаллизаторе, кг

Для заготовки прямоугольного сечения

$$m_{кор} := \frac{\delta_{кор}}{2} \cdot \rho_{Тс} \cdot 2(a + b) \cdot L_{кр}$$

$$m_{кор} = 426.231$$

Для заготовки круглого сечения

$$m_{\text{кор}} := \frac{\delta_{\text{кор}}}{2} \cdot \rho_{\text{тс}} \cdot \pi \cdot d \cdot L_{\text{кр}}$$

Тепловой поток кристаллизации, кВт/м<sup>2</sup>

Для заготовки прямоугольного сечения

$$q_{\text{кр}} := \frac{\lambda_{\text{кр}} \cdot m_{\text{кор}}}{\frac{L_{\text{кр}} \cdot 60}{u_p} \cdot [2(a + b) \cdot L_{\text{кр}}]}$$

$$q_{\text{кр}} = 480.937$$

Для заготовки круглого сечения

$$q_{\text{кр}} := \frac{\lambda_{\text{кр}} \cdot m_{\text{кор}}}{\frac{L_{\text{кр}} \cdot 60}{u_p} \cdot (\pi \cdot d \cdot L_{\text{кр}})}$$

### 11.1.2 Расчет теплового потока конвекции

Конвективная составляющая теплового потока определяется средней скоростью жидкой стали в кристаллизаторе  $w_{\text{жс}}$ , м/с.

Оценку этого параметра можно дать исходя из условия неразрывности на основе расчетной скорости открытой или закрытой струи металла ( $w_{\text{стр}}$ ) при ее входе к кристаллизатор и отношения площадей сечения струи (примем, что она равна площади сечения расливочного стакана промковша) и кристаллизатора (заготовки)

$$w_{\text{стр}} := \sqrt{2 \cdot 9.81 \cdot h}$$

$$w_{\text{стр}} = 5.425$$

Для заготовки прямоугольного сечения

$$w_{\text{жс}} := w_{\text{стр}} \cdot \pi \cdot \frac{\left(\frac{d_{\text{рстк}}}{1000}\right)^2}{4 \cdot a \cdot b}$$

$$w_{\text{жс}} = 0.032$$

Для заготовки круглого сечения

$$w_{\text{жс}} := w_{\text{стр}} \cdot \pi \cdot \frac{\left(\frac{d_{\text{рстк}}}{1000}\right)^2}{4 \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4}}$$

Критериальное уравнение теплообмена между жидкой ванной и фронтом растущих кристаллов запишем в виде

$$Nu = 0.018 \cdot Re^{0.8} \cdot \epsilon$$

$$Nu = \frac{\alpha_{\text{жс}} \cdot b}{\lambda_{\text{жс}}}$$

число Нуссельта для жидкой стали в кристаллизаторе

где

$$\nu_{\text{жс}} := 10^{-6}$$

кинематическая вязкость жидкой стали, м<sup>2</sup>/с;

$$\lambda_{\text{жс}} := 30$$

теплопроводность жидкой стали, Вт/мК

$$Re_{жс} := \frac{w_{жс} \cdot b}{\nu_{жс}}$$

число Рейнольдса для жидкой стали в кристаллизаторе

$$\varepsilon = f\left(\frac{L_{мет}}{b}\right)$$

коэффициент нестационарности движения жидкой стали. При порядке величины  $\frac{L_{мет}}{b}$  более 50 и значении Re порядка  $10^5$  величина  $\varepsilon$  может быть принята 1,0-1,02.

$$\varepsilon := 1$$

$$\alpha_{жс} := \frac{0.018 \cdot \left(\frac{w_{жс} \cdot b}{\nu_{жс}}\right)^{0.8} \cdot \varepsilon \cdot \lambda_{жс} \cdot 10^{-3}}{b}$$

$$\alpha_{жс} = 3.016$$

перегрев жидкой стали над температурой кристаллизации, К  
для низко- и среднеуглеродистой стали

$$\Delta t_{жс} := 30$$

для высокоуглеродистой и сложнoleгированной стали

$$\Delta t_{жс} := 20$$

Тепловой поток конвекции составит, кВт/м<sup>2</sup>

$$q_{конв} := \alpha_{жс} \cdot \Delta t_{жс}$$

$$q_{конв} = 90.477$$

Общий тепловой поток, проходящий через стенку кристаллизатора к охлаждающей воде, кВт/м<sup>2</sup>

$$q = q_{кр} + q_{конв} = 571.414$$

## 11.2. Скорость и расход воды, необходимые для поглощения расчетного теплового потока

Критериальное уравнение теплообмена между стенкой кристаллизатора и охлаждающей водой имеет вид

$$Nu_B = 0.021 \cdot Re_B^{0.8} \cdot Pr_B^{0.43}$$

$$Nu_B = \frac{\alpha_B \cdot \delta_B}{\lambda_B}$$

число Нуссельта для охлаждающей воды

$$Re_B = \frac{w_B \cdot \delta_B}{\nu_B}$$

число Рейнольдса для охлаждающей воды

$$\delta_B := 0.01$$

ширина канала для движения воды в кристаллизаторе, м

$$\delta_M := 0.012$$

толщина медной стенки кристаллизатора, м

$$\lambda_B := 0.63$$

теплопроводность воды, Вт/мК

$$\nu_B := 0.8 \cdot 10^{-6}$$

кинематическая вязкость воды, м<sup>2</sup>/с

$$Pr_B := 5.33$$

число Прандтля воды

Необходимый коэффициент теплоотдачи от стенки кристаллизатора к воде ( $\alpha_B$ , кВт/(м<sup>2</sup>К)) определим из уравнения Ньютона на основании расчетного теплового потока. Температуру стенки канала ( $t_{ст}$ ) примем 75<sup>0</sup>С для исключения локального кипения. Температуру воды в канале ( $t_{срв}$ ) определим как среднюю между температурой на входе (20<sup>0</sup>С) и допустимой на выходе по условию невыпадения солей жесткости (50<sup>0</sup>С).

$$t_{ст} := 75$$

$$t_{срв} := \frac{20 + 50}{2}$$

Коэффициент теплоотдачи к воде составит, кВт/(м<sup>2</sup>К)

$$\alpha_B := \frac{q}{t_{ст} - t_{срв}}$$

$$\alpha_B = 14.285$$

Скорость воды ( $w_B$ , м/с) определяют из критериального уравнения теплообмена между стенкой кристаллизатора и охлаждающей водой с учетом выражений для входящих параметров

$$w_B := \frac{\nu_B}{\delta_B} \cdot \left( \frac{\alpha_B \cdot 10^3 \cdot \frac{\delta_B}{\lambda_B}}{0.021 \cdot Pr_B^{0.43}} \right)^{1.25}$$

$$w_B = 3.582$$

Расход воды на охлаждение кристаллизатора составит, м<sup>3</sup>/час

Для кристаллизатора прямоугольного сечения

$$Q_B := w_B \cdot 2 \cdot [(a + 2 \cdot \delta_M) + (b + 2 \cdot \delta_M)] \cdot \delta_B \cdot 3600$$

Для кристаллизатора круглого сечения

$$Q_B := w_B \cdot 2\pi \cdot (d + 2 \cdot \delta_M) \cdot \delta_B \cdot 3600$$

$$Q_B = 682.95$$

### 11.3. Гидравлический расчет кристаллизатора

Заключается в определении потерь давления воды при прохождении через систему охлаждения кристаллизатора.

$$\lambda_{тр} := 0.02$$

коэффициент трения при движении воды в каналах охлаждения

$$\rho_B := 1000$$

плотность воды, кг/м<sup>3</sup>

$$\zeta_{мс} := 2.5$$

коэффициент местных сопротивлений в канале охлаждения

$$k_p := 1.25$$

коэффициент резерва (на случай роста трения из-за развития шероховатости при эксплуатации кристаллизатора)

Принято, что шаг между каналами для движения воды равен удвоенной толщине медной стенки кристаллизатора.

Потери давления воды в кристаллизаторе составят, МПа

для кристаллизатора прямоугольного сечения

$$\Delta P_{\text{к}} := k_{\text{р}} \cdot \left[ \lambda_{\text{тр}} \cdot \frac{L_{\text{кр}} \cdot \left[ 2 \cdot \left( \frac{a+b}{2\delta_{\text{М}}} \right) \right]}{\delta_{\text{В}}} + \zeta_{\text{мс}} \right] \cdot \rho_{\text{В}} \cdot \frac{w_{\text{В}}^2}{2} \cdot 10^{-6}$$

$$\Delta P_{\text{к}} = 3.768$$

для кристаллизатора круглого сечения

$$\Delta P_{\text{к}} := k_{\text{зап}} \cdot \left[ \lambda_{\text{тр}} \cdot \frac{L_{\text{кр}} \cdot \left( \frac{\pi \cdot d}{2\delta_{\text{М}}} \right)}{\delta_{\text{В}}} + \zeta_{\text{мс}} \right] \cdot \rho_{\text{В}} \cdot \frac{w_{\text{В}}^2}{2} \cdot 10^{-6}$$

Величина потерь давления не должна превышать давления воды в магистрали (обычно 1,2-1,6 МПа). В противном случае следует разбить кристаллизатор на несколько параллельно включенных контуров охлаждения.

## 12. Расчет температуры поверхности металла на выходе из кристаллизатора.

Из условия постоянства теплового потока через многослойную стенку от металла к воде можно записать уравнение Фурье для участка "корочка" от жидкой фазы до поверхности.

$$q = \frac{t_{\text{с}} - t_{\text{пов}}}{\frac{\delta_{\text{кор}}}{\lambda_{\text{кор}}}}$$

$$\lambda_{\text{кор}} := 35$$

теплопроводность корочки, Вт/мК

Тогда температура поверхности заготовки составит, °С

$$t_{\text{пов}} := t_{\text{с}} - q \cdot 10^3 \cdot \frac{\delta_{\text{кор}} \cdot 10^{-3}}{\lambda_{\text{кор}}}$$

$$t_{\text{пов}} = 1.171 \times 10^3$$

Полученное значение температуры поверхности заготовки используют при расчете системы вторичного охлаждения заготовки.

## 13. Расчет системы вторичного охлаждения.

Принято 3 зоны вторичного охлаждения (ЗВО), которые равномерно по длине охватывают технологическую ось МНЛЗ от нижнего торца кристаллизатора до достижения металлургической длины машины (пзво=3).

Принцип расчета для каждой из ЗВО заключается в нахождении коэффициента теплоотдачи от поверхности заготовки с определенной температурой к водовоздушной смеси на основании расчетного теплового

потока кристаллизации и излучения, а затем - расхода водовоздушной смеси, подаваемой системой форсунок на боковую поверхность заготовки, по приведенным в литературе эмпирическим зависимостям от коэффициента теплоотдачи.

$$n_{\text{ЗВО}} := 3$$

Температура водовоздушной смеси, °C

$$t_{\text{ВВС}} := 25$$

Постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м<sup>2</sup>К<sup>4</sup>)

$$\sigma_{\text{СБ}} := 5.67 \cdot 10^{-8}$$

Степень черноты поверхности заготовки

$$\epsilon_{\text{ПОВ}} := 0.6$$

Длину ЗВО можно определить как

$$L_{\text{ЗВО}} := L_{\text{мет}} - L_{\text{кр}} \cdot k_{\text{зап}}$$

Зона 1

Масса корочки, кг

для прямоугольной в сечении заготовки

$$m_{\text{кор1}} := \frac{k_{\text{кр1}} \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\left(\frac{L_{\text{ЗВО}}}{n_{\text{ЗВО}} \cdot u_{\text{р}}}\right)} \cdot 2(a+b) \cdot \left(\frac{L_{\text{ЗВО}}}{n_{\text{ЗВО}}}\right) \cdot \rho_{\text{ТС}} \cdot 10^3}{2}$$

$$m_{\text{кор1}} = 4.838 \times 10^3$$

для круглой в сечении заготовки

$$m_{\text{кор1}} := \frac{k_{\text{кр1}} \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\left(\frac{L_{\text{ЗВО}}}{n_{\text{ЗВО}} \cdot u_{\text{р}}}\right)} \cdot \pi \cdot d \cdot \left(\frac{L_{\text{ЗВО}}}{n_{\text{ЗВО}}}\right) \cdot \rho_{\text{ТС}} \cdot 10^3}{2}$$

Отводимый тепловой поток, кВт/м<sup>2</sup>

для прямоугольной в сечении заготовки

$$q_{\text{отв1}} := \frac{m_{\text{кор1}} \cdot \lambda_{\text{кр}}}{\left[\frac{\left(\frac{L_{\text{ЗВО}}}{n_{\text{ЗВО}}}\right)}{\frac{u_{\text{р}}}{60}}\right] \cdot \frac{L_{\text{ЗВО}}}{n_{\text{ЗВО}}} \cdot 2(a+b)} + \sigma_{\text{СБ}} \cdot \epsilon_{\text{ПОВ}} \cdot \left[ (t_{\text{ПОВ}} + 273)^4 - (t_{\text{ВВС}} + 273)^4 \right] \cdot 10^{-3}$$

$$q_{\text{отв1}} = 476.727$$

для круглой в сечении заготовки

$$q_{\text{отв1}} := \frac{m_{\text{кор1}} \cdot \lambda_{\text{кр}}}{\left[\frac{\left(\frac{L_{\text{ЗВО}}}{n_{\text{ЗВО}}}\right)}{\frac{u_{\text{р}}}{60}}\right] \cdot \frac{L_{\text{ЗВО}}}{n_{\text{ЗВО}}} \cdot \pi \cdot d} + \sigma_{\text{СБ}} \cdot \epsilon_{\text{ПОВ}} \cdot \left[ (t_{\text{ПОВ}} + 273)^4 - (t_{\text{ВВС}} + 273)^4 \right] \cdot 10^{-3}$$

Коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup>К

$$\alpha_1 := \frac{q_{\text{отв1}} \cdot 10^3}{t_{\text{ПОВ}} - t_{\text{ВВС}}}$$

$$\alpha_1 = 415.819$$

Удельный расход воды (гв, м3/(м2\*час)) связан с коэффициентом теплоотдачи эмпирической зависимостью [3, с 128]

$$q_{в1} := \frac{\alpha_1}{42}$$

$$q_{в1} = 9.9$$

Общий расход воды в ЗВО1 составит, м3/час для прямоугольной в сечении заготовки

$$Q_{в1} := q_{в1} \cdot \left[ \frac{L_{ЗВО}}{n_{ЗВО}} \cdot 2(a+b) \right]$$

$$Q_{в1} = 226.208$$

для круглой в сечении заготовки

$$Q_{в1} := q_{в1} \cdot \left( \frac{L_{ЗВО}}{n_{ЗВО}} \cdot \pi \cdot d \right)^{\square}$$

Расход воздуха (Qвозд, нм3/час) соотносится с расходом воды соотношением [4, с.57] (10-55):1 при давлении воздуха 1,5-6 атм. В среднем можно принять расход воздуха, нм3/час

$$Q_{возд1} := 30 \cdot Q_{в1}$$

$$Q_{возд1} = 6.786 \times 10^3$$

Снижение температуры поверхности заготовки

для прямоугольной в сечении заготовки

$$\Delta t_1 := \frac{q_{отв1} \cdot \left[ \frac{\left( \frac{L_{ЗВО}}{n_{ЗВО}} \right) \cdot L_{ЗВО}}{\frac{c_p}{60}} \cdot 2(a+b) \right]}{(a \cdot b) \cdot \left( \frac{L_{ЗВО}}{n_{ЗВО}} \right) \cdot \rho_{тс} \cdot 10^3 \cdot C_{тс}}$$

$$\Delta t_1 = 173.708$$

для круглой в сечении заготовки

$$\Delta t_1 := \frac{q_{отв1} \cdot \left[ \frac{\left( \frac{L_{ЗВО}}{n_{ЗВО}} \right) \cdot L_{ЗВО}}{\frac{c_p}{60}} \cdot \pi \cdot d \right]^{\square}}{\left( \pi \cdot \frac{d^2}{4} \right) \cdot \left( \frac{L_{ЗВО}}{n_{ЗВО}} \right) \cdot \rho_{тс} \cdot 10^3 \cdot C_{тс}}$$

Зона 2

Масса корочки, образовавшейся в зоне 2, кг

для прямоугольной в сечении заготовки

$$m_{кор2} := \left[ \frac{k_{кр1} \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \sqrt{\left( \frac{L_{ЗВО}}{n_{ЗВО} \cdot u_p} \right)} \cdot (\sqrt{2} - \sqrt{1}) \right] \cdot 2(a+b) \cdot \left( \frac{L_{ЗВО}}{n_{ЗВО}} \right) \cdot \rho_{тс} \cdot 10^3$$

$$m_{кор2} = 2.004 \times 10^3$$

для круглой в сечении заготовки

$$m_{\text{кор2}} := \left[ \frac{k_{\text{кр1}} \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \sqrt{\left( \frac{L_{\text{ЗВО}}}{n_{\text{ЗВО}} \cdot u_p} \right) \cdot (\sqrt{2} - \sqrt{1})} \right] \cdot \pi \cdot d \cdot \left( \frac{L_{\text{ЗВО}}}{n_{\text{ЗВО}}} \right) \cdot \rho_{\text{ТС}} \cdot 10^3$$

Отводимый тепловой поток, кВт/м2

для прямоугольной в сечении заготовки

$$q_{\text{отв2}} := \frac{m_{\text{кор2}} \cdot \lambda_{\text{кр}}}{\left[ \frac{\left( \frac{L_{\text{ЗВО}}}{n_{\text{ЗВО}}} \right)}{\frac{u_p}{60}} \right] \cdot \frac{L_{\text{ЗВО}}}{n_{\text{ЗВО}}} \cdot 2(a+b)} + \sigma_{\text{СБ}} \cdot \epsilon_{\text{пов}} \cdot \left[ (t_{\text{пов}} + 273)^4 - (t_{\text{ввс}} + 273)^4 \right] \cdot 10^{-3}$$

$$q_{\text{отв2}} = 284.069$$

для круглой в сечении заготовки

$$q_{\text{отв2}} := \frac{m_{\text{кор2}} \cdot \lambda_{\text{кр}}}{\left[ \frac{\left( \frac{L_{\text{ЗВО}}}{n_{\text{ЗВО}}} \right)}{\frac{u_p}{60}} \right] \cdot \frac{L_{\text{ЗВО}}}{n_{\text{ЗВО}}} \cdot \pi \cdot d} + \sigma_{\text{СБ}} \cdot \epsilon_{\text{пов}} \cdot \left[ (t_{\text{пов}} + 273)^4 - (t_{\text{ввс}} + 273)^4 \right] \cdot 10^{-3}$$

Коэффициент теплоотдачи, Вт/м2К

$$\alpha_2 := \frac{q_{\text{отв2}} \cdot 10^3}{(t_{\text{пов}} - \Delta t_1) - t_{\text{ввс}}}$$

$$\alpha_2 = 292.021$$

Удельный расход воды составит, м3/(м2\*час)

$$q_{\text{в2}} := \frac{\alpha_2}{42}$$

$$q_{\text{в2}} = 6.953$$

Общий расход воды в ЗВО2 составит, м3/час

для прямоугольной в сечении заготовки

$$Q_{\text{в2}} := q_{\text{в2}} \cdot \left[ \frac{L_{\text{ЗВО}}}{n_{\text{ЗВО}}} \cdot 2(a+b) \right]$$

$$Q_{\text{в2}} = 158.861$$

для круглой в сечении заготовки

$$Q_{\text{в2}} := q_{\text{в2}} \cdot \left( \frac{L_{\text{ЗВО}}}{n_{\text{ЗВО}}} \cdot \pi \cdot d \right)$$

Расход воздуха (Q<sub>возд</sub>, нм3/час) составит, нм3/час

$$Q_{\text{возд2}} := 30 \cdot Q_{\text{в2}}$$

$$Q_{\text{возд2}} = 4.766 \times 10^3$$

Снижение температуры поверхности заготовки

для прямоугольной в сечении заготовки

$$\Delta t_2 := \frac{q_{отв2} \left[ \frac{\left( \frac{L_{ЗВО}}{n_{ЗВО}} \right) \cdot L_{ЗВО}}{\frac{c_p}{60} \cdot n_{ЗВО}} \cdot 2(a+b) \right]}{(a \cdot b) \cdot \left( \frac{L_{ЗВО}}{n_{ЗВО}} \right) \cdot \rho_{Тс} \cdot 10^3 \cdot C_{Тс}}$$

$$\Delta t_2 = 103.508$$

для круглой в сечении заготовки

$$\Delta t_2 := \frac{q_{отв2} \left[ \frac{\left( \frac{L_{ЗВО}}{n_{ЗВО}} \right) \cdot L_{ЗВО}}{\frac{c_p}{60} \cdot n_{ЗВО}} \cdot \pi \cdot d \right]}{\left( \pi \cdot \frac{d^2}{4} \right) \cdot \left( \frac{L_{ЗВО}}{n_{ЗВО}} \right) \cdot \rho_{Тс} \cdot 10^3 \cdot C_{Тс}}$$

Зона 3

Масса корочки, образовавшейся в зоне 3, кг

для прямоугольной в сечении заготовки

$$m_{кор3} := \left[ \frac{k_{кр1} \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \sqrt{\left( \frac{L_{ЗВО}}{n_{ЗВО} \cdot u_p} \right) \cdot (\sqrt{3} - \sqrt{2})} \right] \cdot 2(a+b) \cdot \left( \frac{L_{ЗВО}}{n_{ЗВО}} \right) \cdot \rho_{Тс} \cdot 10^3$$

$$m_{кор3} = 1.538 \times 10^3$$

для круглой в сечении заготовки

$$m_{кор3} := \left[ \frac{k_{кр1} \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \sqrt{\left( \frac{L_{ЗВО}}{n_{ЗВО} \cdot u_p} \right) \cdot (\sqrt{3} - \sqrt{2})} \right] \cdot \pi \cdot d \cdot \left( \frac{L_{ЗВО}}{n_{ЗВО}} \right) \cdot \rho_{Тс} \cdot 10^3$$

Отводимый тепловой поток, кВт/м2

для прямоугольной в сечении заготовки

$$q_{отв3} := \frac{m_{кор3} \cdot \lambda_{кр}}{\left[ \frac{\left( \frac{L_{ЗВО}}{n_{ЗВО}} \right)}{\frac{c_p}{60}} \right] \cdot \frac{L_{ЗВО}}{n_{ЗВО}} \cdot 2(a+b)} + \sigma_{СБ} \cdot \epsilon_{пов} \cdot \left[ (t_{пов} + 273)^4 - (t_{ввс} + 273)^4 \right] \cdot 10^{-3}$$

$$q_{отв3} = 252.372$$

для круглой в сечении заготовки

$$q_{отв3} := \frac{m_{кор2} \cdot \lambda_{кр}}{\left[ \frac{\left( \frac{L_{ЗВО}}{n_{ЗВО}} \right)}{\frac{c_p}{60}} \right] \cdot \frac{L_{ЗВО}}{n_{ЗВО}} \cdot \pi \cdot d} + \sigma_{СБ} \cdot \epsilon_{пов} \cdot \left[ (t_{пов} + 273)^4 - (t_{ввс} + 273)^4 \right] \cdot 10^{-3}$$

Коэффициент теплоотдачи, Вт/м2К

$$\alpha_3 := \frac{q_{отв3} \cdot 10^3}{[t_{пов} - (\Delta t_1 + \Delta t_2)] - t_{ввс}}$$

$$\alpha_3 = 290.329$$

Удельный расход воды составит, м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>\*час)

$$q_{вз} := \frac{\alpha_3}{42}$$

$$q_{вз} = 6.913$$

Общий расход воды в ЗВО2 составит, м<sup>3</sup>/час

для прямоугольной в сечении заготовки

$$Q_{вз} := q_{вз} \left[ \frac{L_{ЗВО}}{n_{ЗВО}} \cdot 2(a + b) \right]$$

$$Q_{вз} = 157.941$$

для круглой в сечении заготовки

$$Q_{вз} := q_{вз} \left[ \frac{L_{ЗВО}}{n_{ЗВО}} \cdot \pi \cdot d \right]$$

Расход воздуха (Q<sub>возд</sub>, нм<sup>3</sup>/час) составит, нм<sup>3</sup>/час

$$Q_{возд} := 30 \cdot Q_{вз}$$

$$Q_{возд} = 4.738 \times 10^3$$

Снижение температуры поверхности заготовки

для прямоугольной в сечении заготовки

$$\Delta t_3 := \frac{q_{отвз} \left[ \frac{\left( \frac{L_{ЗВО}}{n_{ЗВО}} \right) \cdot L_{ЗВО}}{\frac{c_p}{60}} \cdot \frac{2(a + b)}{n_{ЗВО}} \right]}{(a \cdot b) \cdot \left( \frac{L_{ЗВО}}{n_{ЗВО}} \right) \cdot \rho_{тс} \cdot 10^3 \cdot C_{тс}}$$

$$\Delta t_3 = 91.958$$

для круглой в сечении заготовки

$$\Delta t_3 := \frac{q_{отвз} \left[ \frac{\left( \frac{L_{ЗВО}}{n_{ЗВО}} \right) \cdot L_{ЗВО}}{\frac{c_p}{60}} \cdot \frac{\pi \cdot d}{n_{ЗВО}} \right]}{\left( \pi \cdot \frac{d^2}{4} \right) \cdot \left( \frac{L_{ЗВО}}{n_{ЗВО}} \right) \cdot \rho_{тс} \cdot 10^3 \cdot C_{тс}}$$

Температура поверхности заготовки в конце ЗВО, °С

$$t_{повЗВО} := t_{пов} - (\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3)$$

$$t_{повЗВО} = 802.303$$

#### 14. Расчет кривой разгиба заготовки

Выполнен в соответствии с методикой [1, с.456-458]. Заключается в определении радиусов и координат нескольких точек выпрямления заготовки, разливаемой на современных МНЛЗ криволинейного типа при переходе от постоянного базового радиуса (ниже кристаллизатора) к горизонтальной прямой. Современные МНЛЗ предполагают выполнение

разгиба при наличие жидкой сердцевины. Поэтому, при расчете кривой разгиба учитывают механические характеристики стали в температурном интервале хрупкости.

Полагают что разгиб нужно начинать при относительной толщине корки равной  $0,45 < c < 0,65$

$$c = \frac{2 \cdot \delta_{\text{кор1}}}{b}$$

$$c := 0,6$$

Расстояние между точками разгиба принято  $t$ , м

$$t := 1,0$$

Толщина корки, при которой начинают разгиб заготовки, мм

$$\delta_{\text{кор1}} := \frac{c \cdot b \cdot 10^3}{2}$$

$$\delta_{\text{кор1}} = 60$$

Время движения заготовки до точки начала разгиба, мин составит

$$\tau_{\text{нр}} := \frac{\delta_{\text{кор1}}^2}{k_{\text{кр1}}}$$

$$\tau_{\text{нр}} = 3,359$$

Расстояние от нейтральной оси до опасного сечения, м

$$y := \delta_{\text{кор1}} \cdot 10^{-3} \cdot \Theta$$

$$y = 0,045$$

Время нахождения деформируемого слоя в температурном интервале хрупкости, мин

$$\tau_{\text{тхк}} := \tau_{\text{нр}} \cdot \left( \frac{1}{\Theta^2} - 1 \right)$$

$$\tau_{\text{тхк}} = 2,613$$

Радиусы точек точки разгиба заготовки ( $R_i$ , м) рассчитывают по формуле. Номера точек  $i=1, i=2, i=3, \dots$

$$i := 1$$

Радиус 1-й точки разгиба составит, м

$$R_1 := \frac{1}{\frac{1}{R_{\text{МНЛЗ}}} - i \cdot \frac{t \cdot \epsilon_{\text{д}}}{y \cdot \nu_{\text{р}} \cdot \tau_{\text{тхк}}}}$$

$$R_{\text{МНЛЗ}} = 8,751$$

$$R_1 = 10,889$$

За центр координат принимают конец радиального участка технологической оси МНЛЗ. Тогда координаты 1-й точки разгиба будут, м

$$x_1 := t \cdot \cos\left(\frac{t}{R_1}\right)$$

$$x_1 = 0,996$$

$$y_1 := -t \cdot \sin\left(\frac{t}{R_1}\right)$$

$$y_1 = -0,092$$

Радиус 2-й точки разгиба составит, м

$$i := 2$$

$$R_2 := \frac{1}{\frac{1}{R_{\text{МНЛЗ}}} - i \cdot \frac{t \cdot \epsilon_d}{y \cdot u_p \cdot \tau_{\text{тик}}}}$$

$$R_2 = 14.408$$

Координаты 2-й точки разгиба будут соответственно, м:

$$x_2 := x_1 + t \cdot \cos\left(\frac{t}{R_2}\right)$$

$$x_2 = 1.993$$

$$y_2 := y_1 - t \cdot \sin\left(\frac{t}{R_2}\right)$$

$$y_2 = -0.161$$

Расчет продолжают, пока величина радиуса разгиба не станет бесконечно большой (обычно 5-20 точек).

### 15. Расчет усилия вытягивания заготовки из кристаллизатора.

Коэффициент трения между заготовкой и кристаллизатором принять:

$$\mu_{\text{тр}} := 0.2$$

при использовании жидкой шлакообразующей смеси

$$\mu_{\text{тр}} := 0.45$$

при использовании жидкой смазки (масло, парафин)

Усилие вытягивания ( $F_{\text{выт}}$ , кН) рассчитывают по формуле [1, с. 490]

$$F_{\text{выт}} := 0.5 \cdot \mu_{\text{тр}} \cdot \rho_{\text{жс}} \cdot [2 \cdot (a + b) \cdot (L_{\text{кр}} \cdot k_{\text{зап}})] \cdot R_{\text{МНЛЗ}} \cdot \sin\left(\frac{L_{\text{кр}} \cdot k_{\text{зап}}}{R_{\text{МНЛЗ}}}\right)$$

$$F_{\text{выт}} = 7.701$$

Выполнить эскиз технологической линии МНЛЗ: промковш- кристаллизатор – ЗВО – участок разгиба с указанием (можно в виде таблицы) значений расчетных параметров ( п. 1-15) и основных исходных данных: годовая производительность, масса плавки.

## ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Методические указания к курсовой работе по дисциплине «Непрерывная разливка стали». Разработал: доцент Тимошенко С.Н. ДОННТУ. 2011 г. 18с.
2. Григорьев В.П., Нечкин Ю.М., Егоров А.В., Никольский Л.Е. Конструкции и проектирование агрегатов сталеплавильного производства. М.: Изд. МИСИС, 1995.-512с.
3. Основы проектирования металлургических заводов. Справочное издание / В.А. Авдеев, В.М. Друян, Б.И. Кудрин.- М.: Интермет Инжиниринг, 2002.-464 с.
4. Тепловые процессы при непрерывном литье стали. Под ред. Ю.А. Самойловича. М.: Металлургия, 1982.-152с.
5. Буланов Л.В., Корзунин Л.Г., Парфенов Е.П., Юровский Н.А., Авдонин В.Ю. Машины непрерывного литья заготовок. Теория и расчет. Казань. Изд. "Идел-Пресс".-2003.-320с.