Раздел 6. Теория и технология разливки стали.
Тема 6.2.Разливка стали на МНЛЗ

Лекции № 169

Тема: Теплофизические процессы при кристаллизации и затвердевании. Теплопередача от слитка к кристаллизатору, изменение температуры поверхности.

План лекции:

1.Теплофизические процессы при кристаллизации и затвердевании.

2.Теплопередача от слитка к кристаллизатору, изменение температуры поверхности.

По сравнению с классически отлитым слитком непрерывнолитая заготовка движется вертикально или горизонтально, причем толщина застывшего металла на выходе из кристаллизатора очень мала. Определение этой толщины в зависимости от скорости разливки, температуры разливаемого металла, его химического состава и условий отвода тепла в кристаллизаторе очень важно для установления технологии разливки. После выхода из кристаллизатора заготовка направляется с помощью опорных валков или водоохлаждаемых направляющих в зону вторичного охлаждения, где интенсивно охлаждается водой. Современной технологией непрерывной разливки предусмотрено снижение теплового удара путем уменьшения интенсивности охлаждением заготовки, что позволяет предотвратить возникновение трещин. По выходе из водоохлаждаемой зоны поверхность заготовки охлаждается путем излучения и естественной конвекции. На практике специалистов интересует глубина жидкой фазы общее время затвердевания заготовки и рост корки в зоне вторичного охлаждения.

В отдельных зонах МНЛЗ от заготовки отводятся следующие количества тепла: в кристаллизатор ~ 20–40 % от общего, отданного заготовкой (меньшее значение – для листовых заготовок больших размеров, большее – для малых листовых и квадратных заготовок); в зоне вторичного охлаждения ~ 40–55 %, затем ~ 20–30 % до полного остывания.

Плотность теплового потока, Вт/м^2, находим по эмпирической формуле:

$$q = 2{,}679 \cdot 10^6 - 3{,}349 \cdot 10^5 \sqrt{\tau} \qquad (3.1)$$

где τ — время, с.

На основании существовавших ранее измерений в кристаллизаторе плотность теплового потока в верхней его части определили равной 1,86–2,33 МВт·м$^{-2}$. В результате теплового сопротивления в середине кристаллизатора он снижается до значений 0,7–0,93 МВт·м$^{-2}$, а на выходе из него на расстоянии 600–700 мм от него составляет 0,23–0,47 МВт·м$^{-2}$. В прямоугольных кристаллизаторах плотность теплового потока вдоль узких сторон меньше, так как здесь быстрее возникает зазор между слитком и кристаллизатором. В верхней части кристаллизатора на узкой стороне плотность теплового потока равна 1,39–1,63 МВт·м$^{-2}$, а в нижней части 0,401–0,349 МВт·м$^{-2}$.

Отвод тепла находится в прямой связи с температурой поверхности заготовки. Предположим, что до момента возникновения зазора между заготовкой и кристаллизатором (на расстоянии 100–200 мм от уровня стали в кристаллизаторе) температура поверхности быстро снижается до 600–900 °С. Однако она снова быстро повышается и по выходе из кристаллизатора температура поверхности заготовки на широкой стороне составляет ~ 700–1100 °С, а на узкой 1100–1250 °С (большие температуры относятся к большим скоростям разливки). Температуры внутренней стороны медной стенки кристаллизатора составляют 120–140 °С, внешней 80–100°С. Для большого кристаллизатора (сечением 483×305 мм) была установлена путем измерения температура поверхности медной стенки; в верхней части кристаллизатора 210–225, в середине 160 и внизу (125 мм от дна) 125 °С.

Для расчета примерной плотности теплового потока, Вт·м$^{-2}$, в прямоугольном кристаллизаторе Д.П. Евтеев ввел соотношение:

$$q = a\exp(-b\tau) + c \qquad (3.2)$$

Здесь a равно $1{,}5\cdot10^6$ для широкой стороны, $1{,}57\cdot10^6$ для узкой; c равно $0{,}47\cdot10^6$ и $0{,}41\cdot10^6$, соответственно b составляет 0, и 220; τ – время нахождения слитка в кристаллизаторе, ч.

Для τ=0,01 ч плотность теплового потока через широкую грань кристаллизатора, рассчитанная по уравнению (3.2), составляет 1079,89 кВт·м$^{-2}$. Если длина кристаллизатора l = 0,065 м, скорость при разливке v=1,5 м·мин$^{-1}$, то время пребывания заготовки в кристаллизаторе τ = 0,65/90 = $7{,}22\cdot10^{-3}$ ч, а для широкой грани плотность теплового потока по формуле (3.2) составляет $1{,}196\cdot10^6$, для узкой - $7{,}277\cdot10^5$ Вт·м$^{-2}$. На основании известных температур поверхности заготовки можно приблизительно определить коэффициент теплоотдачи от заготовки в кристаллизаторе:

$$\alpha_{ш.с.} = (1{,}196\cdot10^6)/1000 = 1200 Вт\cdot м^{-2}\cdot К^{-1}; \quad \alpha_{у.с.} = (7{,}277\cdot10^5)/1150 = 630 Вт\cdot м^{-2}\cdot К^{-1}.$$

Скорость охлаждения в зоне вторичного охлаждения имеет решающее влияние на структуру заготовки. Поэтому все время следует наблюдать за этим параметром непрерывной разливки. Несмотря на то, что условия теплоотдачи на этом участке необычайно сложные, при помощи расчета достигнуты значительные успехи.

При описании передачи тепла от твердого тела к обтекающей его жидкости или газу имеется ввиду теплообмен. Количество тепла Q, Дж, переходящее с поверхности тела в окружающую среду, определяется по формуле Ньютона:

$$Q=\alpha\cdot(t_n-t_{ср})\cdot S\cdot\tau, \qquad (3.3)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт·м$^{-2}$·К$^{-1}$;

t_n – температура поверхности тела, ^{0}С;

$t_{ср}$ – температура окружающей среды, ^{0}С;

S – охлаждаемая площадь, м^2;

τ – время, с.

В общих чертах можно принять, что для теплообмена в зоне вторичного охлаждения будет действительно согласно уравнению (3.3) соотношение

$$Ф = \alpha(t(x,\tau)_{x=0} - t_0)S, \qquad (3.4)$$

а с учетом теплового потока

$$Ф = \lambda(t/x)_{x=0}S. \qquad (3.5)$$

Если известны тепловой поток Ф и температура поверхности заготовки, можно рассчитать по вышеуказанным уравнениям коэффициент теплопередачи в зоне вторичного охлаждения $\alpha_{вт}$

Аналитическое определение нестационарной теплопроводности, которое теоретически позволяет установить температурный градиент по уравнению (3.5), нельзя использовать для расчета теплового поля заготовки потому, что температура поверхности значительно ниже теоретической. Как известно, постоянство температуры поверхности слитка является непременным условием аналитического решения.

Преимуществом аналитического решения, по сравнению с приблизительными методами, является его быстрота.

Метод А.В.Д. Хилса

Анализ процесса затвердевания заготовки в кристаллизаторе провел Хилс. Расчет теплового поля заготовки ведет к полиному, константы которого рассчитывают с учетом поверхностных условий. Уравнения и результаты даны в безразмерных параметрах, что позволяет легко применять их для произвольных исходных данных и размеров заготовки. Расчетом установлены толщина застывшей корки в зависимости от расстояния от уровня металла, температура на поверхности заготовки и тепло, отведенное кристаллизатором.

Безразмерное расстояние от уровня стали в кристаллизаторе

$$x' = \alpha_k^2 x/(\rho c\lambda v) = \alpha_k^2 \tau/(\lambda c\rho),$$

где x – реальное расстояние, м;

τ – время нахождения заготовки на глубине x в кристаллизаторе, с;

v – скорость заливки, м·с$^{-1}$;

$\alpha_л$ – коэффициент теплоотдачи от поверхности заготовки к охлаждающей воде, Вт·м$^{-2}$·K^{-1}:

$$\alpha_л = [(1/\alpha_1) + (d/\lambda_{ж}) + (\delta.\lambda_{Cu})]^{-1}, \qquad (3.5а)$$

где d – толщина зазора между заготовкой и стенкой кристаллизатора;

$\lambda_{ж}$ – коэффициент теплопроводности жидкого вещества в зазоре;

δ – толщина медной стенки кристаллизатора;

λ_{Cu} – коэффициент теплопроводности меди;

α_1 – коэффициент теплоотдачи от внешней стороны медной стенки кристаллизатора к охлаждающей воде (определяют по критериальным соотношениям).

Хилс использовал уравнение Nu = 0,023 (Re)^{0,8} (Pr)^{0,33} и параметры: Y – эффективная длина кристаллизатора, м (соответствует уровню стали в кристаллизаторе); $Y' = Y\alpha_1^2/(v\rho c\lambda)$ – безразмерная длина кристаллизатора; $\xi' = \alpha_k \xi/\lambda$ – безразмерная толщина застывшей стали; ξ – реальная толщина застывшей корки, м; $t = t_П/t_S$ – безразмерная температура поверхности заготовки; $t_П$ – реальная температура поверхности заготовки, °С; t_S – температура солидуса; $H' = L_1/(ct_S)$ – безразмерное общее тепло затвердевания; L_1 – реальная скрытая теплота затвердевания (включая теплоту перегрева) $L_1 \neq L + c(t_1 - t_S)$ (здесь t_1 – температура разливаемой стали); $Q' = q'/[(Yvc\rho\lambda)^{1/2} t_S]$ – безразмерное тепло, отведенное от части заготовки длиной x, приходящееся на единицу окружности кристаллизатора; q' – реальное тепло, отведенное из части заготовки длиной x, приходящееся на единицу окружности кристаллизатора за единицу времени.

Для определения толщины корки в кристаллизаторе ξ', температуры поверхности заготовки и количества отведенного тепла Q' А.В.Д. Хилс [16] установил ряд упрощенных соотношений, которые в системе СИ имеют вид:

$$\xi' = 5{,}695 \cdot 10^2 (x')^{0{,}74}; \qquad (3.6)$$

$$t' = 1 - [2{,}248 \cdot 10^2 (x')^{0{,}74} \qquad (3.7)$$

$$Q' = 14{,}82 (Y')^{0{,}38}. \qquad (3.8)$$

При изучении охлаждения заготовки при непрерывной разливке отмечено, что основное влияние на рост слоя стали оказывают следующие факторы: величина зазора между заготовкой и кристаллизатором; коэффициент теплопроводности в зазоре; конусность кристаллизатора.

Определение температуры затвердевшей стали в кристаллизаторе на основании теплового потока от поверхности заготовки к кристаллизатору

Для расчета температуры застывшей корки в кристаллизаторе К. Фекете разработал примерные упрощенные методы. Он исходит из рассуждений, что кристаллизатор в МНЛЗ является теплообменником, работающим противоточно, так что можно считать, что разливаемая сталь охлаждается проточной водой. Им получено соотношение:

$$\Delta t_x = \Delta t_p \exp[-\alpha S_x (H_1^{-1} - H_2^{-1})], \qquad (3.9)$$

где Δt_x – разность температур между жидкой сталью и охлаждающей кристаллизатор водой;

Δt_p – разность температур обоих веществ при входе в кристаллизатор;

α – коэффициент теплоотдачи, Вт· м$^{-2}$ ·К$^{-1}$;

S_x – охлаждающая внутренняя поверхность кристаллизатора, м^2;

$H_1 = abv\rho c$ – энтальпия стали;

H_2 – энтальпия воды, равная $M_{H_2O} \cdot c_{H_2O}$;

$a \cdot b$ – внутреннее сечение кристаллизатора, м;

v – скорость вытягивания, м·с $^{-1}$;

ρ – плотность застывшей стали, равная 7600 кг·м $^{-3}$;

c – теплоемкость стали, равная 0,14 Дж · кг $^{-1}$·К$^{-1}$.

На основании известных результатов изучения отвода тепла, проведенного Х. Крайнером и Б. Тарманном, а также И. Саважем и В.Х. Притчардом, К. Фекете составил уравнение для отвода тепла кристаллизатором:

$$q = 2{,}6749 \cdot 10^6 \exp(-0{,}0386\tau) + 5{,}815 \cdot 10^3 \tau - 11{,}339 \cdot 10^4 \;\; Вт \cdot м^{-2}. \qquad (3.10)$$

Для определения средней плотности теплового потока $\bar{q}$ от кристаллизатора на данном расстоянии х от уровня стали в кристаллизаторе необходимо проинтегрировать предыдущее соотношение:

$$\bar{q} = (1/\tau_x) \int_0^{\tau_x} q d\tau; \qquad (3.11)$$

$$\bar{q} = 69{,}3148 \cdot 10^6 (1/\tau_x)[1 - \exp(-0{,}0386\tau_x)] + 2{,}907 \cdot 10^3 \tau_x - 11{,}339 \cdot 10^4 \;\; Вт \cdot м^{-2}, \qquad (3.12)$$

где τ_x - время, с.

Согласно уравнению (3.3) получим:

$$\bar{q} = \alpha \Delta t_{1g} \qquad (3.13)$$

где Δt_{1g}, К – среднелогарифмическая разность температур в кристаллизаторе между сталью и охлаждающей водой:

$$\Delta t_{1g} = (\Delta t_2 - \Delta t_1)/[\ln(\Delta t_2 / \Delta t_1)] \qquad (3.14)$$

Здесь $\Delta t_2 = t_1 - t_{2k}$, $\Delta t_1 = t_{1k} - t_{2p}$ (индекс 1 относится к стали, 2 — к воде; р — для температуры входа; *к* — выхода).

Из теории расчета теплового обмена известно, что среднелогарифмическую разность можно заменить среднеарифметической, если

$$(\Delta t_2 / \Delta t_1) \le 1{,}17.$$

По-видимому, эти условия при разливке стали на МНЛЗ будут всегда выполняться:

$$\Delta t_{1g} = \Delta t_{арифм}; \qquad (3.14а)$$

$$\Delta t_{арифм} = 0{,}5[(t_{1,p} - t_{1,x}) - (t_{2,x} + t_{2,p})]. \qquad (3.15)$$

При этом упрощении коэффициент теплоотдачи из уравнения (3.13) будет выражен следующим образом:

$$\alpha = \bar{q} / \Delta t_{арифм} \ Вт \cdot м^{-2} \cdot K^{-1} \qquad (3.16)$$

Теперь подставим соотношение под уравнением (3.13) и (3.15) в уравнение (3.9) и одновременно заменим по предполагаемым температурным разностям Δt_x и Δt_p выражения:

$$\Delta t_x = t_{1,x} - t_{2,x}, \qquad (3.16а)$$

$$\Delta t_p = t_{1,p} - t_{2,p} \qquad (3.16в)$$

В результате получим из уравнения (3.9):

$$t_{1,x} - t_{2,x} = (t_{1,p} - t_{2,p}) \exp\left\{S_x(\bar{q} / \Delta \bar{t}_{арифм})[(1/H)_1 - (1/H_2)]\right\} \qquad (3.17)$$

В уравнение (3.17) следует еще подставить выражение, которое определяет количество общего тепла затвердевания в зависимости от времени. Если толщина корки

$$\xi = 0{,}024\sqrt{(\tau/60)} = 0{,}0031\sqrt{\tau} \qquad (3.18)$$

то бщий объем застывшей корки на расстоянии х от уровня стали,:

$$V = 4{,}133 \cdot 10^{-3} \upsilon \sqrt{\tau}(a + b - 4{,}6499 \cdot 10^{-3}\sqrt{\tau}) \ м^3 \cdot c^{-1}. \qquad (3.19)$$

Количество освободившегося общего тепла q_z, $Вт \cdot м^{-2}$, которое должны отвести за время τ через единицу поверхности S_x, выражают как плотность теплового потока:

$$q_z = (4{,}133 \cdot 10^{-3} / S_x)\upsilon\sqrt{\tau}(a + b - 4{,}65 \cdot 10^{-3}\sqrt{\tau})\rho Z. \qquad (3.20)$$

Получим окончательный вид уравнения для расчета средней температуры застывшего слоя металла в кристаллизаторе, который будет иметь вид:

$$t_{1,x} = t_{1,p} \exp\left\{-(\bar{q} - q_L)(t_{1,p} + t_{1,x} - 2t_{2,p})^{-1} \cdot 2S_x[(ab\upsilon\rho c)^{-1} - H_2^{-1}]\right\}, \qquad (3.21)$$

где

$$2t_{2p} \approx (t_{2,p} + t_{2,k}).$$

Градиент температуры в застывшей корке стали определим графически с помощью двух точек в координатах:

$y_1 = a/2 - \xi$, (3.22а)

соответствующих границе зоны кристаллизации с температурой $t_{1,p}$, и

$y_2 = 0{,}5(a - \xi)$ (3.22б)

отвечающих средней температуре $t_{1,x}$ корки, рассчитанной по соотношению (3.21).

Расчет температуры поверхности в зоне вторичного охлаждения.

Для выбора режима охлаждения в зависимости от разливаемой стали (температуры поверхности слитка в конце ЗВО) и скорости вытягивания слитка задается кривая температуры поверхности по длине слитка. Эта кривая выбирается из условия минимизации термических напряжений в непрерывнолитом слитке, что достигается равенством скоростей охлаждения слоев металла, расположенных у фронта кристаллизации и на поверхности

$$\left|dt/d\tau\right|_{x=0} / \left|dt/d\tau\right|_{x=\delta} = \varphi .$$

Решение этого равенства позволило получить следующее уравнение

$$\frac{(1+\theta_0)(1-\theta_к)}{(1-\theta_0)(1+\theta_к)} = \left(\frac{a}{2\delta_0}\right)^{\varphi}, \qquad (3.35)$$

где $\theta_o = t_o/t_r$ – относительная температура поверхности и заготовки на выходе из кристаллизатора;

t_o – тем-ра поверхности слитка на выходе из кристаллизатора, °С;

t_r – температура кристаллизации стали, °С;

$\theta_к = t_к/t_r$ – относительная температура поверхности заготовки в конце затвердевания; ($t_к$ – температура поверхности слитка в конце затвердевания, °С);

а – толщина слитка;

δ_o – толщина оболочки слитка при выходе из кристаллизатора.

Как следует из уравнения, если заданы толщина оболочки, температура поверхности слитка на выходе из кристаллизатора и температура поверхности слитка в конце зоны затвердевания, то для каждого размера заготовки и скорости вытягивания существует определенная закономерность изменения температуры поверхности слитка по его длине, при которой коэффициент φ имеет максимальное постоянное значение на всем участке охлаждения.

Так как коэффициент φ постоянен, то для любого участка зоны вторичного охлаждения можно записать

$$\frac{(1+\theta_0)(1-\theta_к)}{(1-\theta_0)(1+\theta_к)} = \left(\frac{\delta}{\delta_0}\right)^{\varphi} \; или \; \frac{T_o}{T_n} = \left(\frac{\delta}{\delta_0}\right)^{\varphi}, \qquad (3.36)$$

где θ_n и δ – относительная температура и толщина оболочки слитка в момент времени τ;

$$T_o = \frac{1+\theta_o}{1-\theta_o};\; T_n = \frac{1+\theta_n}{1-\theta_n};\; T_к = \frac{1+\theta_к}{1-\theta_к}.$$

Если известно распределение температуры по длине слитка, то приведенное уравнение позволяет определить толщину оболочки слитка в любой момент времени τ.

Время достижения соответствующей температуры поверхности определяется из выражения

$$\tau = \frac{\rho * q_к * \delta^2}{2\varphi\lambda t_r}\left\{\begin{aligned}&\left(\frac{T_o}{T_n}\right)^{2/\varphi}\left[\frac{T_n}{2/\varphi-1}+\varphi+\frac{1}{T_n(2/\varphi+1)}\right]- \\ &-\left[\frac{T_o}{2/\varphi-1}+\varphi+\frac{1}{T_o(2/\varphi+1)}\right]\end{aligned}\right\}, \qquad (3.37)$$

где ρ – плотность жидкой стали;

$q_к$ – скрытая теплота плавления стали;

λ – коэффициент теплопроводности стали.

Уравнения (3.36), (3.37) позволяют построить зависимости температуры поверхности слитка и толщины затвердевающей оболочки от времени или глубины жидкой лунки для заданных скоростей разливки и температуры поверхности слитка в конце затвердевания.

Температуру поверхности заготовки также можно определить из уравнения:

$$\theta^{(2/\varphi)-1}/(2/\varphi-1)+2\theta^{2/\varphi}/(2/\varphi)+(\theta^{(2/\varphi)+1})/(2/\varphi+1)=8k\tau. \qquad (3.38)$$

Здесь θ – безразмерная температура:

$$\theta=(1-\theta_p)/(1+\theta_p). \qquad (3.38а)$$

Параметр φ определим по формуле

$$\varphi\ln(0{,}5D/\xi_0)=\ln\{(1+\theta_{p,k})(1-\theta_{p,BT})/[(1-\theta_{p,k})(1+\theta_{p,BT})]\} \qquad (3.39)$$

Величину К рассчитаем по уравнению:

$$K=\varphi\lambda t_S/\{4\rho Z\xi^2[(1+\theta_{p,k})/(1-\theta_{p,k})]^{2/\varphi}\}. \qquad (3.40)$$

Остальные величины: $\theta_p = t(0,\tau)/t_S$ – безразмерная температура поверхности заготовки; $\theta_{p,k} = t(0,\tau_k)/t_S$ – безразмерная температура поверхности заготовки на выходе из кристаллизатора; $\theta_{p,BT} = 800/t_S$ – безразмерная температура поверхности заготовки в конце зоны вторичного охлаждения; $\xi_0 = 0{,}194\sqrt{\tau_k}$ – толщина корки стали на выходе из кристаллизатора.

При расчете температуры поверхности θ_p исходим из уравнения (3.39). Определяем на основании значений температуры поверхности на выходе из кристаллизатора $\theta_{p,k}$ и в конце зоны вторичного охлаждения $\theta_{p,BT}$ параметр φ; затем рассчитываем значение k по уравнению (3.40) и в заключение по уравнению (3.38) находим температуру θ_p.

Возможности определения коэффициента теплоотдачи при непрерывной разливке стали.

Коэффициент теплоотдачи в кристаллизаторе

Обозначим верхнюю зону сравнительно плотного контакта образующей корки заготовки со стенкой кристаллизатора индексом I, а нижнюю зону кристаллизатора, где возникает зазор между заготовкой и кристаллизатором, индексом II. На основании общеизвестной теории отведения тепла А.И. Вейника можно рассчитать время $\tau_{\Delta t}$, за которое отводится тепло перегрева стали над температурой ликвидуса по отношению

$$\tau_{\Delta t} = R_e\rho c(t_1-t_S)/[\alpha_{k,1}(t_1-t_{H_2O})], \qquad (3.41)$$

где R_e – релятивная толщина (υ / S)слитка;

$\alpha_{k,1}$ – коэффициент теплоотдачи в кристаллизаторе;

t_1 – температура разливаемой стали;

t_{H_2O} – температура охлаждающей воды.

Подставим $\tau_{\Delta t} = l_1 / \upsilon$, где l_1 – длина зоны 1 кристаллизатора, а υ – скорость разливки, и получим соотношение для длины зоны 1:

$$l_1 = (2{,}78 \cdot 10^{-4} R_e c\rho\upsilon / \alpha_{k,1}) \cdot (t_1 - t_S)/(t_1 - t_{H_2O}). \qquad (3.42)$$

Предположим, что для отношения (3.42) выполнено условие: длина l_1 отвечает длине зоны, в которой отводится тепло перегрева. Это представление значительно упрощено, однако уравнение дает приблизительно основание для расчета длины l_1, которая позволяет рассчитать тепловой поток от поверхности отливки, согласующийся с экспериментально замеренными значениями.

А.А. Скворцов и А.Д. Акименко вводят для полного коэффициента теплоотдачи в верхней зоне кристаллизатора уравнение

$$\alpha_{K,1} = [\alpha_{p,1}^{-1} + \delta_{Cu} / \lambda_{Cu} + \alpha_1^{-1}]^{-1} \qquad (3.43)$$

где $\alpha_{p,1}$ – коэффициент теплоотдачи от поверхности заготовки к кристаллизатору;

δ_{Cu} – толщина стенки кристаллизатора;

α_1 – коэффициент теплоотдачи между охлаждающей водой и кристаллизатором.

Коэффициент $\alpha_{p,1}$ можно теоретически определить на основании критериального уравнения для конвективного переноса тепла:

$$Nu = 1{,}1(1 - \mathrm{Pr}^{1/3} Pe)^{1/2}, \qquad (3.44)$$

которое действительно для Re < 50 000; эти условия будут всегда выполнены при разливке из промежуточного ковша в кристаллизатор (число Рей-нольдса колеблется от $3 \cdot 10^3$ до $6 \cdot 10^3$). Рассчитанные значения из уравнения (3.44) примерно на 60 % выше полученных экспериментально. Причиной несогласования являются факторы, которые не учтены критериальным уравнением, прежде всего неровности поверхности заготовки и наличие смазки изложницы.

Для зоны II определение общего коэффициента теплоотдачи от поверхности заготовки через медную стенку кристаллизатора к охлаждающей воде возможно по уравнению (3.45)

$$\alpha_{K,2} = (1/\alpha_1 + d / \lambda_g + \delta_{Cu} / \lambda_{Cu})^{-1}, \qquad (3.45)$$

которое не учитывает излучения при передаче тепла с поверхности заготовки к кристаллизатору. Эта предпосылка для зовы 2 действительна, если зазор между кристаллизатором и заготовкой < 0,02 мм.

Значение коэффициента α_1, можем рассчитать с помощью критериального уравнения

$$Nu = 0{,}023(\mathrm{Re})^{0,8}(\mathrm{Pr})^{0,32}. \qquad (3.46)$$

Коэффициент теплоотдачи $\alpha_{K,2}$, который включает влияние излучения:

$$\alpha_{K,2} = [(1/\alpha_{p,2}) + (\delta_{Cu}/\lambda_{Cu}) + (1/\alpha_1)]^{-1}. \qquad (3.47)$$

В соотношение (3.47) включено излучение тепла зазором между поверхностью заготовки и стенкой кристаллизатора. Величина $\alpha_{p,2}$ определяется так же, как и при стационарной разливке заготовки

$$\alpha_{p,2} = \lambda_g / d + c[(T_p/100)^4 - (T_{BH}/100)^4ъ/(t_П - t_{BH}), \qquad (3.47а)$$

где λ_g – теплопроводность вещества в зазоре;

d – зазор;

t_{BH}, T_{BH} – температура внутренней поверхности кристаллизатора, °С, К.

Зазор d можно определить из балансного соотношения. Тепло, прошедшее с поверхности слитка через зазор, отводится медной стенкой кристаллизатора к воде.

Подведенное тепло $Q = [c(T_p/100)^4 + (\lambda_g/d)(t_p - t_{BH})]S.$

Отведенное тепло $Q_2 = [(\delta_{Cu}/\lambda_{Cu} + 1/\alpha_1)^{-1}(t_{BH} - t_{H_2O})]S, Q_1 = Q_2;$

$$d = \lambda_g(t_p - t_{BH})/[(\delta_{Cu}/\lambda_{Cu} + \alpha_1^{-1})^{-1}(t_{BH} - t_{H_2O}) - c(T_p/100)^4]. \qquad (3.48)$$

Так как $(T_p/100)^4 >> (T_{BH}/100)^4$, другим членом уравнения можно пренебречь.

Температура внутренней поверхности кристаллизатора определяется из теплового баланса:

$$\alpha_{p,2}(t_p - t_{BH}) = (\delta_{Cu}/\lambda_{Cu} + \alpha_1^{-1})^{-1}(t_{BH} - t_{H_2O}); \qquad (3.49)$$

$$t_{BH} = [\alpha_{p,2}t_p + (\delta_{Cu}/\lambda_{Cu} + \alpha_1^{-1})^{-1}t_{H_2O}][\alpha_{p,2} + (\delta_{Cu}/\lambda_{Cu} + \alpha_1^{-1})^{-1}]^{-1}. \qquad (3.50)$$

Коэффициент теплоотдачи в зоне вторичного охлаждения.

Тепло, отводимое от поверхности заготовки в зоне вторичного охлаждения, складывается из трех составляющих: в местах, непосредственно охлаждаемых водой, тепло расходуется на обогрев воды и ее частичное испарение; на не смачиваемых поверхностях тепло выделяется и передается излучением и конвекцией; к местам контакта поверхности заготовки с тянущими валками тепло отводится теплоотдачей.

1. Коэффициент α_{BT} можно приблизительно рассчитать по уравнению теплового баланса охлаждающей воды:

$$\alpha_{BT} = \frac{M_{H_2O}(1-x)(t_2 - t_1) + M_{H_2O}x(640 - t_1)}{S_{BT}(t_П - t_1)} c_{H_2O}, \qquad (3.51)$$

где M_{H_2O} – расход воды в зоне вторичного охлаждения, $кг \cdot^{-1}$;

S_{BT} – охлаждаемая площадь заготовки в зоне вторичного охлаждения, м^2;

t_1 и t_2 – начальная и конечная температура воды,°С;

$t_П$ – температура поверхности слитка, °С;

x – отношение испарившейся воды к общему количеству охлаждающей воды (0,02–0,04).

Выражения, полученные для охлаждения поверхности заготовки при прокатке на непрерывных станах, можно применить при вторичном охлаждении непрерывно отливаемого слитка только в ограниченном объеме. До настоящего времени применяют чаще всего эмпирические формулы, полученные на основании промышленных исследований.

2. Коэффициент теплоотдачи $\alpha_{ВТ}$ можно определить из выражения для плотности теплового потока q, $Вт \cdot м^{-2}$, проходящего через застывший слой стали:

$$q = (\lambda / \xi)\Delta t;$$

$$\Delta t = (t_З - t_П). \qquad (3.52)$$

где ξ – толщина застывшей корки стали;

$t_З$ – температура затвердевания;

$t_П$ – температура поверхности заготовки в зоне вторичного охлаждения.

По параболическому закону получим также:

$$\xi = K\sqrt{\tau}; \qquad k = \varphi k, \qquad (3.53)$$

где К зависит от формы заготовки.

Х. Вайнрайх определил значение К, $м / с^{1/2}$, на основании замеренных толщин застывшей стали (определение сделано на основании результатов, достигнутых фирмой “Concast” на МНЛЗ) по выражению

$$K = \varphi(2A\lambda\Delta t)^{0,5}; \qquad (3.54)$$

φ= 1,41 для заготовок квадратного сечения, 1,77 круглого, 1,68 восьмигранного; А = $2{,}7467 \cdot 10^{-10} м^3 \cdot Дж^{-1}$.

Плотность теплового потока, $Вт \cdot м^{-2}$, после подстановки (3.54) в (3.52):

$$q = 4{,}2665 \cdot 10^4 \cdot (1/\varphi)(\lambda\Delta t / \tau)^{0,5}. \qquad (3.55)$$

Коэффициент теплоотдачи $\alpha_{ВТ}$, $Вт \cdot м^{-2} \cdot К^{-1}$:

$$\alpha_{ВТ} = q/(t_П - t_О). \qquad (3.55а)$$

Константа затвердевания в зоне вторичного охлаждения по данным Х. Вайнрайха равна 23-24 $мм \cdot мин^{-1/2}$.

Вопросы для самоконтроля:

1.Теплофизические процессы при кристаллизации и затвердевании.

2.Теплопередача от слитка к кристаллизатору, изменение температуры поверхности.

3. По сравнению с классически отлитым слитком непрерывнолитая заготовка как движется вертикально или горизонтально?

4.Куда направляется заготовка после выхода из кристаллизатора?

5. В какой зоне заготовка интенсивно охлаждается водой?

6.В отдельных зонах МНЛЗ от заготовки отводятся следующие количества тепла: в кристаллизатор ~… –…. % от общего, отданного заготовкой (меньшее значение – для листовых заготовок больших размеров, большее – для малых листовых и квадратных заготовок); в зоне вторичного охлаждения ~ …–… %, затем ~ …–… % до полного остывания. Назовите эти показатели .

Использованная литература:

С.В. Куберский "Непрерывная разливка стали"