щих каналов щелевого кристаллизатора следует проводить в направлении одновременного уменьшения ширины каналов, расстояния между каналами, глубины каналов и скорости воды в каналах. При этом во избежание образования накипи на стенках каналов охлаждение кристаллизаторов следует производить обессоленной водой. Обессоленная вода должна циркулировать по замкнутому контуру, нагреваясь в кристаллизаторе и охлаждаясь в промежуточном теплообменнике.

Литература

1. *Калягин, Ю.А.* Исследование теплообмена в кристаллизаторе МНЛЗ с круглыми и щелевыми каналами / Ю.А. Калягин, Н.И. Шестаков, О.В. Манько, С.В. Лукин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2004. – № 12. – С. 29 – 31.

2. *Лукин, С.В.* Тепловые процессы при разливке стали на машинах непрерывного литья заготовок / С.В. Лукин. – Череповец, 2008.

3. *Самарский, А.А.* Вычислительная теплопередача / А.А. Самарский, П.Н. Вабищев. – М., 2003.

УДК 621.746. 27

С.В. Лукин, А.Н. Кибардин, Ю.А. Калягин, В.И. Славов

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В РАБОЧЕЙ СТЕНКЕ ЩЕЛЕВОГО КРИСТАЛЛИЗАТОРА МАШИНЫ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК

В статье представлена инженерная методика расчета теплопередачи в рабочей стенке щелевого кристаллизатора машины непрерывного литья заготовок, позволяющая достаточно точно учитывать эффект оребрения стенки со стороны охлаждающей воды.

Теплопередача, кристаллизатор, машина непрерывного литья заготовок.

The paper presents the engineering method of calculation of heat transfer in the working wall of slot mold of the machine of the continuous casting billets, allowing to take into account the ribbing effect of the wall from the side of the cooling water.

Heat transfer, mold, machine of the continuous casting billets.

Современные машины непрерывного литья заготовок часто оборудуют щелевыми кристаллизаторами, в которых охлаждающая вода циркулирует в пазах, расположенных между медной стенкой и чугунным корпусом. В настоящее время отсутствуют достаточно точные инженерные методики расчета теплопередачи в рабочей стенке щелевого кристаллизатора. Схема рабочей стенки щелевого кристаллизатора и основные геометрические размеры показаны на рис. 1.

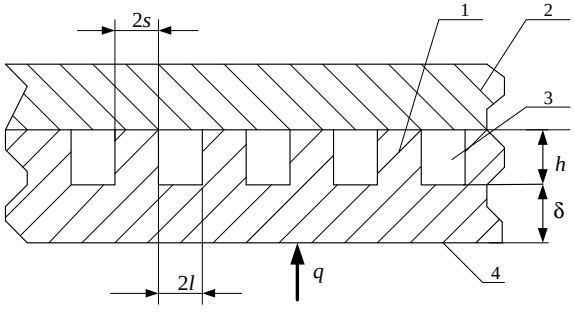


Рис. 1. Схема рабочей стенки щелевого кристаллизатора

1 – медная плита; 2 – стальная пластина; 3 – прямоугольный паз, заполненный охлаждающей водой; 4 – рабочая поверхность стенки кристаллизатора; δ – толщина стенки от рабочей поверхности до основания паза; *2s* – расстояние между пазами; *h* – глубина паза (длина ребра); *2l* – ширина паза (канала); *q* – плотность теплового потока, поступающего к рабочей стенке от затвердевающего слитка

Расчетная схема элемента рабочей стенки щелевого кристаллизатора показана на рис. 2. Можно увидеть, что поверхностью 1 рабочая стенка контактирует с отливаемым слитком, а поверхностью 3 и 4 – с охлаждающей водой. Поверхность 5 соприкасается с чугунным корпусом. На поверхностях 2 и 6 выполняется условие геометрической и тепловой симметрии, поэтому здесь теплообмен отсутствует (адиабатические поверхности). Размеры ребра: $h \times s$. Размеры основания стенки: $\delta \times (s + l)$.

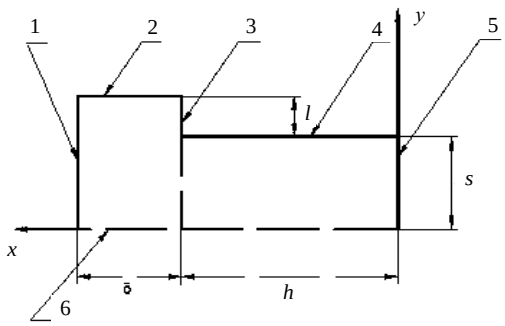


Рис. 2. Расчетная схема элемента рабочей стенки

Для расчета эффективного коэффициента теплоотдачи от рабочей стенки щелевого кристаллизатора к охлаждающей воде, учитывающего эффект оребрения, можно использовать выражение, полученное в [1]:

$$\alpha_{эф} = \frac{\alpha\left(E \cdot h + l\right)}{s + l}, \qquad (1а)$$

где E – коэффициент эффективности оребрения, определяемый выражением:

$$E = th\left(\left(h/s\right)\sqrt{\alpha \cdot s/\lambda}\right) \Big/ \left(\left(h/s\right)\sqrt{\alpha \cdot s/\lambda}\right), \qquad (1б)$$

где α – обычный коэффициент теплоотдачи от поверхности к охлаждающей воде; λ – коэффициент теплопроводности материала стенки; δ, s, l, h – геометрические размеры рабочей стенки, показанные на рис. 1.

Однако в щелевых кристаллизаторах ребра имеют большую толщину, поэтому выражение (1) дает существенную погрешность, как получено в предположении одномерности температурного поля в ребрах, что для толстых ребер не выполняется. Получим решение, учитывающее двухмерность температурного поля в ребрах.

Введем избыточную температуру $\vartheta = t - t_{в}$, где t – температура стенки; $t_{в}$ – температура охлаждающей воды, выбранная за начало отсчета. Температурное поле стенки опишется уравнением Лапласа:

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} = 0. \qquad (2)$$

Рабочую стенку можно представить состоящей из двух элементов: основания стенки толщиной δ и ребра. Ввиду малой толщины задачу расчета теплообмена в основании стенки считаем одномерной. Расчет температурного поля и термического сопротивления здесь не вызывает затруднений. Остановимся на расчете теплообмена в ребре длиной h и толщиной $2s$. Граничные условия будут следующими:

$$\partial\vartheta/\partial x\big|_{x=0} = 0, \quad 0 \le y \le s;$$
$$\partial\vartheta/\partial y\big|_{y=0} = 0, \; 0 \le x \le h;$$
$$\partial\vartheta/\partial y\big|_{y=s} = -\left(\alpha/\lambda\right) \cdot \vartheta\big|_{y=s}, \; 0 \le x \le h;$$
$$\vartheta\big|_{x=h} = \vartheta_0, \; 0 \le y \le s,$$

где x, y – текущие координаты; ϑ_0 – избыточная температура у основания ребра.

С учетом граничных условий методом разделения переменных получено решение уравнения (2), описывающее температурное поле в ребре рабочей стенки щелевого кристаллизатора:

$$\vartheta\left(x, y\right) = 2\vartheta_0 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{D_k}{\operatorname{ch}\left(\mu_k \cdot h/s\right)} \times$$
$$\times \cos\left(\mu_k \cdot \frac{y}{s}\right) \cdot \operatorname{ch}\left(\mu_k \cdot \frac{x}{s}\right), \qquad (3)$$
$$D_k = \frac{\sin\mu_k}{\mu_k + \sin\mu_k \cdot \cos\mu_k}.$$

Коэффициенты μ_k находятся из характеристического уравнения:

$$\operatorname{tg}\left(\mu\right) = \mathrm{Bi}/\mu, \qquad (4)$$

где $\mathrm{Bi} = \alpha \cdot s/\lambda$ – критерий Био.

Известно, что корни μ_k уравнения (4) представляют бесконечную последовательность возрастающих чисел: $\mu_1 < \mu_2 < \ldots < \mu_n < \ldots$. Поэтому ряд в (3) является быстро сходящимся для точек с координатой $x < h$.

Плотность теплового потока определяется законом Фурье:

$$q = \lambda \cdot \left|\partial\vartheta/\partial n\right|,$$

где n – текущая координата. Из выражения (3) получим, что плотность теплового потока в ребре рабочей стенки кристаллизатора в направлении x в основании ребра равна:

$$q_x\left(h, y\right) = 2 \cdot \lambda \cdot \vartheta_0 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{D_k \cdot \mu_k/s}{\operatorname{ch}\left(\mu_k \cdot h/s\right)} \times$$
$$\times \cos\left(\mu_k \cdot \frac{y}{s}\right) \cdot \operatorname{sh}\left(\mu_k \cdot \frac{h}{s}\right). \qquad (5)$$

Для определения средней плотности теплового потока q_x в основании ребра функцию (5) необходимо проинтегрировать на отрезке от 0 до s и разделить на длину этого отрезка s:

$$\overline{q}_x\left(h\right) = \frac{1}{s}\int_0^s q_x\left(h, y\right) dy =$$
$$= 2 \cdot \lambda \cdot \vartheta_0 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{D_k/s}{\operatorname{ch}\left(\mu_k \cdot h/s\right)} \cdot \sin\left(\mu_k\right) \cdot \operatorname{sh}\left(\mu_k \cdot h/s\right).$$

Тепловой поток, проходящий через половину основания ребра длиной 1 м (Вт/м), определится выражением:

$$q_{lp} = \overline{q}_x\left(h\right) \cdot s = 2 \cdot \lambda \cdot \vartheta_0 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{D_k}{\operatorname{ch}\left(\mu_k \cdot h/s\right)} \times$$
$$\times \sin\left(\mu_k\right) \cdot \operatorname{sh}\left(\mu_k \cdot h/s\right). \qquad (6)$$

Тепловой поток, проходящий через половину основание паза, определяется выражением теплоотдачи к охлаждающей воде:

$$q_{l0} = \alpha \cdot \vartheta_0 \cdot l. \qquad (7)$$

Введем линейное термическое сопротивления ребра рабочей стенки кристаллизатора:

$$R_{lp} = \frac{\vartheta_0}{q_{lp}} =$$

$$= \left\{ 2 \cdot \lambda \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{D_k}{\mathrm{ch}\left(\mu_k \cdot h/s\right)} \cdot \sin\left(\mu_k\right) \cdot \mathrm{sh}\left(\mu_k \cdot h/s\right) \right\}^{-1}. \quad (8)$$

Линейная плотность теплового потока рабочей стенки с учетом (6), (7) и (8) определяется выражением:

$$q_l = \left(q_{l0} + q_{lp}\right) \cdot 2m = \vartheta_0 \cdot \left(1/R_{lp} + \alpha \cdot l\right) \cdot 2m, \quad (9)$$

где m – количество ребер в стенке.

Эффективный коэффициент теплоотдачи от рабочей стенки к охлаждающей воде определится выражением:

$$\alpha_{эф} = \frac{q_l}{P \cdot \vartheta_0}, \quad (10)$$

где $P = 2m \cdot (s + l)$ – периметр рабочей стенки кристаллизатора.

С учетом (9) и (10) получим выражение для расчета $\alpha_{эф}$:

$$\alpha_{эф} = \left(1/R_{lp} + \alpha \cdot l\right) \Big/ \left(s + l\right), \quad (11)$$

где величина R_{lp} определяется выражением (8).

Обычный коэффициент теплоотдачи α определяется по известным эмпирическим зависимостям. Достаточно точной является формула Петухова [3], полученная при турбулентном течении капельных жидкостей и газов при $0{,}5 < \mathrm{Pr} < 200$ и $4000 < \mathrm{Re} < 10^7$:

$$\mathrm{Nu} = \frac{\xi}{8} \cdot \frac{\mathrm{Re} \cdot \mathrm{Pr}}{1 + \dfrac{900}{\mathrm{Re}} + 12{,}7\sqrt{\dfrac{\xi}{8}} \cdot \left(\mathrm{Pr}^{2/3} - 1\right)}, \quad (12)$$

где $\mathrm{Re} = w \cdot d_э / \nu_в$ – критерий Рейнольдса; $\mathrm{Nu} = \alpha \cdot d_э / \lambda_в$ – критерий Нуссельта; Pr – число Прандтля для воды; ξ – коэффициент гидравлического сопротивления; w – средняя скорость движения воды в охлаждаемых каналах; $d_э$ – эквивалентный диаметр канала; $\nu_в$ – коэффициент кинематической вязкости для воды; $\lambda_в$ – коэффициент теплопроводности для воды. Величины $\nu_в$, $\lambda_в$ и Pr выбираются по средней температуре охлаждающей воды $t_в$. Коэффициент ξ можно рассчитать по формуле [3]:

$$\xi = \left(0{,}79 \cdot \ln\left(\mathrm{Re}/8\right)\right)^{-2}.$$

Эквивалентный диаметр прямоугольного канала определяется выражением:

$$d_э = \frac{4f}{p} = \frac{2l \cdot h}{l + h},$$

где $f = 2l \cdot 2h$ – площадь сечения канала; $p = 2 \cdot (2l + 2h)$ – периметр канала.

Рассмотрим пример. На вертикальной МНЛЗ сталеплавильного производства ЧерМК ОАО «Северсталь» применяется щелевой кристаллизатор со следующими геометрическими размерами рабочей стенки: h = 0,025 м; l = 0,0045 м; s = 0,013 м; δ = = 0,02 м. Стенка выполнена из меди с коэффициентом теплопроводности λ = 385 Вт/(м · К). Средняя температура охлаждающей воды – $t_в$ = 30 ºС. Скорость воды в каналах – w = 6 м/с. При таких параметрах воды и размерах канала коэффициент теплоотдачи от стенки канала к воде, рассчитанный по формуле (12), равен α = 20000 Вт/(м · К).

Определяем число Био: $\mathrm{Bi} = \alpha \cdot s/\lambda = 20000 \cdot 0{,}013/385 = 0{,}675$. Первые четыре корня характеристического уравнения (4) при этом Bi [3]: μ_1 = 0,74; μ_2 = 3,34; μ_3 = 6,39; μ_4 = 9,49. Расчет линейного термического сопротивления ребра по формуле (8) дает значение R_{lp} = 0,00382 (м · К)/Вт. Бесконечный ряд в (8) является быстросходящимся, и большая точность расчета достигается при использовании первых трех членов ряда. Расчет эффективного коэффициента теплоотдачи от стенки к воде по формуле (11) дает значение $\alpha_{эф}$ = 20110 Вт/(м^2 · К), что ненамного больше, чем обычный коэффициент теплоотдачи α, несмотря на то, что на 1 м^2 плоской поверхности рабочей стенки приходится 1,69 м^2 оребренной поверхности, взаимодействующей с водой. Это объясняется достаточно низким коэффициентом эффективности оребрения E, который, рассчитанный по формуле (1б), в данном примере равняется 0,59. Более точно величину E можно рассчитать в рамках разработанной инженерной методики по выражению:

$$E = \frac{q_{lp}}{\alpha \cdot \vartheta_0 \cdot h} = 2 \cdot \left(\lambda/h\right) \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{D_k}{\mathrm{ch}\left(\mu_k \cdot h/s\right)} \times \times \sin\left(\mu_k\right) \cdot \mathrm{sh}\left(\mu_k \cdot h/s\right). \quad (13)$$

Формула (13) дает для данного примера E = 0,52, т.е. существенно меньше, чем формула (1б). Для сравнения известной инженерной методики (формулы (1а) и (1б)) и разработанной инженерной методики (формулы (8) и (11)), был проведен численный расчет теплопередачи через рабочую стенку щелевого кристаллизатора при указанных условиях. Численный расчет позволяет учесть двухмерность температурного поля не только в ребре, но также в основании рабочей стенки, т.е. является более точным. Было получено, что численный расчет дает $\alpha_{эф}$ = 19800 Вт/(м · К), известная инженерная методика – $\alpha_{эф}$ = 21840 Вт/(м · К), разработанная инженерная методика – $\alpha_{эф}$ = 20110 Вт/(м · К). Таким образом, $\alpha_{эф}$, полученный по известной инженерной методике, на 10,2 % превышает $\alpha_{эф}$, полученный численным методом. Значение $\alpha_{эф}$, полученное по разработанной инженерной методике, лишь на 1,5 % превышает $\alpha_{эф}$, полученное численно.

Таким образом, разработанная инженерная методика позволяет с хорошей точностью рассчитывать $\alpha_{эф}$ на основе выражения (11). Инженерный расчет

теплопередачи в рабочей стенке щелевого кристаллизатора проводится также, как для плоской стенки толщиной δ. Если известна плотность теплового потока q, проходящего через рабочую стенку кристаллизатора, то температура поверхности основания канала, заполненного водой, определяется выражением:

$$t_{\text{осн. кан}} = t_{\text{в}} + q/\alpha_{\text{эф}}. \qquad (14\text{а})$$

Температуру рабочей поверхности стенки, контактирующей со слябом, можно оценить по выражению:

$$t_{\text{раб. пов}} = t_{\text{осн. кан}} + q \cdot \delta/\lambda = t_{\text{в}} + q \cdot \left(\delta/\lambda + 1/\alpha_{\text{эф}}\right). \qquad (14\text{б})$$

Выражения (14) позволяют достаточно точно рассчитывать $t_{\text{осн.кан}}$ и $t_{\text{раб.пов}}$, если плотность теплового потока q незначительно изменяется по высоте рабочей стенки кристаллизатора. В действительности величина q быстро изменяется в верхней части кристаллизатора, что приводит к перетеканию теплоты вдоль рабочей стенки, и действительные температуры $t_{\text{осн.кан}}$ и $t_{\text{раб.пов}}$ получаются несколько другими, чем дают формулы (14 а, б). В верхней части кристаллизатора действительные температуры $t_{\text{осн.кан}}$ и $t_{\text{раб.пов}}$ будут меньше, чем рассчитанные по формулам (14 а, б), а в нижней части кристаллизатора – несколько больше. Так как надежность работы кристаллизатора во многом зависит от температур $t_{\text{осн.кан}}$ и $t_{\text{раб.пов}}$ на уровне мениска жидкого метала, где плотность теплового потока q является максимальной, то определение величин $t_{\text{осн.кан}}$ и $t_{\text{раб.пов}}$ по формулам (14 а, б) дает некоторый запас при расчетах надежной работы кристаллизатора.

Выводы. Представлена инженерная методика расчета теплопередачи в рабочей стенке щелевого кристаллизатора машины непрерывного литья заготовок, позволяющая достаточно точно учитывать эффект оребрения рабочей стенки со стороны охлаждающей воды.

Литература

1. *Калягин, Ю.А.* Исследование теплообмена в кристаллизаторе МНЛЗ с круглыми щелевыми каналами / Ю.А. Калягин, Н.И. Шестаков, О.В. Манько, С.В. Лукин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2004. – № 12. – С. 29 – 31.

2. *Лыков, А.В.* Тепломассообмен: Справочник / А.В. Лыков. – М., 1978.

3. *Петухов, Б.С.* Теплообмен при смешанной турбулентной конвекции / Б.С. Петухов, А.Ф. Поляков. – М., 1986.

УДК 621.746. 27

С.В. Лукин, А.Н. Кибардин, В.В. Мухин

УТИЛИЗАЦИЯ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ В СИСТЕМЕ ОХЛАЖДЕНИЯ МАШИНЫ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК

В статье обоснована возможность утилизации низкопотенциальной теплоты, образующейся в системе охлаждения машины непрерывного литья заготовок. Также предложен способ использования данной теплоты в системе теплоснабжения металлургического завода и близлежащего города.

Утилизация, низкопотенциальная теплота, машина непрерывного литья заготовок.

The article gives proof of the possibility of utilization of low potential heat in the cooling system of the machine of the continuous casting billets. The way of using the heat in the heating supply system of the metallurgical plant and the nearby town is suggested in the paper.

Utilization, low potential heat, machine of the continuous casting billets.

Машина непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) является современным высокотемпературным металлургическим агрегатом, в котором температура жидкой стали, подаваемой в кристаллизатор МНЛЗ, достигает значений 1520÷1550 °С. Доля жидкой стали, разливаемой на МНЛЗ, непрерывно растет во всем мире. В ведущих странах (США, Япония) эта доля приблизилась к 100 %. Наибольшее количество стали разливается на слябовых криволинейных МНЛЗ, получивших распространение благодаря относительно небольшим капитальным затратам и большой производительности.

Основная технологическая задача МНЛЗ – превратить жидкую сталь в твердую заготовку правильной формы (сляб), для чего нужно отвести от металла значительное количество теплоты. Приблизительно 50 % теплоты жидкой стали, подаваемой в МНЛЗ, отводится элементами оборудования МНЛЗ – кристаллизатором и роликами, охлаждаемыми водой, водой, подаваемой непосредственно на поверхность сляба, и паровоздушной смесью, образовавшейся при испарении части воды и удаляемой из бункера МНЛЗ [1], [2].

В настоящее время теплота, отведенная от металла в пределах МНЛЗ, практически никак не используется и теряется в окружающей среде, несмотря на значительное количество. Так, на пяти слябовых криволинейных МНЛЗ ЧерМК ОАО «Северсталь»