В течение отопительного периода, длящегося 8 месяцев в году, экономия топлива на ПВК составит 103,1 тыс. т.у.т., или 86 млн м^3 природного газа. При настоящей цене на природный газ на внутреннем рынке РФ в 3 руб./м^3, экономия денежных затрат на топливо, сжигаемого в ПВК, в течение отопительного периода составит примерно 260 млн руб. При цене на природный газ, которую платит Украина – 0,4 долл/м^3 = 12 руб/м^3, экономия денежных затрат в течение отопительного периода составит приблизительно 1 млрд руб. Кроме того, теплота, полученная на машинах непрерывного литья заготовок, в летнее время может использоваться для горячего водоснабжения, обеспечивая дополнительную экономию топлива и денежных затрат.

Экономические затраты на реализацию данного мероприятия получаются не очень значительными, так как промежуточные теплообменники для охлаждения химочищенной воды, нагретой в кристаллизаторе и роликах, на некоторых МНЛЗ уже имеются, а другие МНЛЗ планируют перевести на охлаждение химочищенной водой (для увеличения срока службы оборудования МНЛЗ). Требуется проложить лишь дополнительный участок тепловой сети, связывающий сталеразливочный цех с водогрейной котельной.

В данной работе показано, что, не изменяя конструкции охлаждаемых элементов криволинейных слябовых МНЛЗ, можно утилизировать примерно 70 % теплоты охлаждения разливаемого металла, отводимой в системе охлаждения МНЛЗ, нагревая при этом сетевую воду до 95 °С. Окончательный подогрев сетевой воды следует производить в пиковой водогрейной котельной. Результатом данного мероприятия являются значительные экономический и экологический эффекты.

Литература

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

2. *Лукин, С.В.* Уменьшение теплового загрязнения при разливке стали на машинах непрерывного литья заготовок / С.В. Лукин, В.М. Аленичев, А.Н. Кибардин // Безопасность жизнедеятельности. – 2011. – № 5. – С. 48 – 53.

3. *Шестаков, В.И.* Теплообмен в роликах машины непрерывного литья заготовок / Н.И. Шестаков, В.Я. Тишков // Черметинформация. – 1992.

УДК 621.746.27

А.И. Павздерин, Д.И. Бородин, Н.Е. Хисамутдинов, З.К. Кабаков

МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ РЕЖИМНЫХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗОНЫ ВТОРИЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ЗАГОТОВОК СЛОЖНОЙ ФОРМЫ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ НА МАШИНАХ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ

В статье предложена методика расчета технологических параметров зоны вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок со сложной формой поперечного сечения, которая позволяет прогнозировать длину зоны вторичного охлаждения, количество секций, расходы воды и участки охлаждаемой поверхности заготовки.

Заготовки сложной конфигурации, ЗВО.

The method of calculating the technological parameters of secondary cooling of the machine of the continuous casting billets with complex shape of cross section is presented in the paper. The technique allows to predict the length of the secondary cooling, the number of sections, water discharge and the plots of a cooled surface of the billet.

Billets of complicated configuration, secondary cooling.

Для получения круглой трубной заготовки ВНИИМЕТМАШем был создан опытно-промышленный литейно-прокатный агрегат, состоящий из МНЛЗ радиального типа и непрерывного четырехклетевого стана с трехвалковыми клетями. Особенностью литейно-прокатного агрегата является отливка слитка трефовидного сечения (рис. 1). Как отмечается в [3], такой профиль затвердевает в 1,3 раза быстрее, чем круглый, а вогнутость граней слитка снижают вызванным ферростатическим давлением напряжения в металле, что, в свою очередь, снижает склонность заготовки к трещинообразованию. Кроме того, трефовидная форма поперечного сечения заготовки удачно сочетается с трехвалковыми прокатными клетями. Это позволяет повысить скорость вытяжки металла и устранить кантовку раскатов [2].

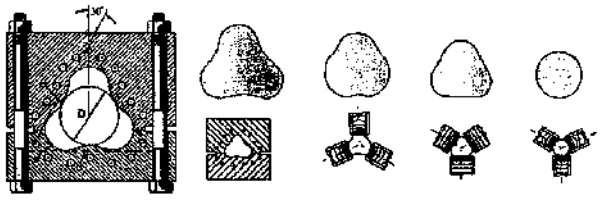


Рис. 1. Кристаллизатор и схема обжатий в прокатных станах трубной заготовки трефовидного сечения

На этом агрегате освоено получение трубной заготовки диаметром 48 и 74 мм. В условиях Первоуральского Новотрубного завода прокатана партия труб сечением 73х5 мм, качество которых соответствовало требованиям стандартов. На основе результатов исследовательских работ спроектированы промышленные литейно-прокатные агрегаты для производства трубных заготовок диаметром 150 мм производительностью 200000 т в год для Первоуральского и Северского трубных заводов [5].

При проектировании зоны вторичного охлаждения (ЗВО) таких заготовок необходимо знать основные технологические и конструктивные параметры ЗВО. При теплотехническом обосновании этих параметров необходимо учитывать особенности теплоотдачи при охлаждении заготовок, связанных с их сложной геометрией поверхности, и выполнить требования к рациональному температурному режиму охлаждения непрерывнолитых заготовок.

Из практики непрерывной разливки стали известно, что кривая охлаждения поверхности слитка в зоне вторичного охлаждения должна удовлетворять следующим требованиям:

– монотонное снижение температуры от кристаллизатора до конца ЗВО;

– отсутствие участков разогрева и переохлаждения на участке ЗВО;

– скорость снижения температуры после кристаллизатора не более 100 град/мин.;

– уровень температуры в конце ЗВО не ниже 900 – 950 °С;

– разогрев после ЗВО не более, чем на 50 °С.

– Таким образом, температурный закон охлаждения поверхности слитка в ЗВО для конкретной скорости литья υ можно считать известным.

Расходы воды в любой секции ЗВО обычно рассчитывают по известной зависимости [1]:

$$\alpha = \alpha_{л} + kg\ , \qquad (1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, обеспечивающий заданный средний уровень температуры поверхности слитка в конкретной секции, g – удельный расход воды в этой секции, k – эмпирический коэффициент (k = 40÷80), $\alpha_{л} = \sigma_0 \varepsilon \left(\overline{T}_{ni}^2 + T_{в}^2\right)\left(\overline{T}_{ni} + T_{в}\right)$ – коэффициент теплоотдачи излучением, σ_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, ε – степень черноты поверхности слитка, $T_в$ – температура воды.

Коэффициент теплоотдачи определяют с помощью математических моделей или инженерных методик, прогнозирующих затвердевание и охлаждение слитка при заданном температурном законе охлаждения поверхности слитка.

В работе [4] предложен метод расчета затвердевания и охлаждения заготовок сложной конфигурации с использованием конформных отображений. Основная идея метода конформных отображений (МКО) состоит в том, что расчетная область сложной формы, для которой не удается получить решение задачи затвердевания, отображается с помощью конформных отображений в прямоугольную область, для которой решение задачи затвердевания имеет достаточно простой вид.

В данной работе этот метод применили для расчета коэффициентов теплоотдачи в ЗВО заготовок произвольного поперечного сечения. Для этого зададим контур поперечного сечения заготовки параметрическими соотношениями вида:

$$\begin{cases} X = f_1(u), \\ Y = f_2(u). \end{cases} \qquad (2)$$

Действуя согласно МКО, получим общее решение задачи, описываемое формулами:

$$\begin{cases} X_{\phi}(\varphi, \psi) = \mathrm{Re}(Z), \\ Y_{\phi}(\varphi, \psi) = \mathrm{Im}(Z) \end{cases} \qquad (3)$$

$$\tau(\xi) = \frac{1 + n + K}{Kn(n+1)} \cdot \frac{1}{\varphi_1}\left(\int \xi \tilde{D} d\xi + C\right). \qquad (4)$$

Здесь $Z = X + iY$ – функция, осуществляющая конформное отображение исходной расчетной области в прямоугольник; C – константа, определяемая из начальных условий.

Аппроксимируем непрерывную кривую охлаждения кусочно-постоянной кривой. Для проектируемой ЗВО МНЛЗ длины участков l_i назначаются из условия:

$$T_{ni} = T_n\left(h_{i-1} + l_i\right) = T_n\left(h_{i-1}\right) - \Delta T \qquad (5)$$

и

$$\overline{T}_{ni} = \frac{T_{ni-1} + T_{ni}}{2} = T\left(h_{i-1}\right) + \frac{\Delta T}{2}, \qquad (6)$$

где ΔT – заданное снижение температуры в пределах каждой секции ЗВО, l_i – длина секции, h_{i-1} – расстояние от мениска до начала i-секции.

Дальнейшие действия выполняются в следующей последовательности:

1. Определяют толщину корки на выходе из кристаллизатора.

Для этого, используя заданное значение температуры поверхности в кристаллизаторе $\overline{T}_{n0}$, определяют значение показателя степени $n_0 = n(K_0)$ в параболическом распределении температуры $T(\psi) = T_k - \left(T_k - T_n\right)\left(1 - \frac{\psi}{\xi}\right)^n$. K_0 – критерий затвердевания, определяемый по формуле: $K = \frac{c_M\left(T_k - T_n\right)}{L}$.

Далее, используя значение n_0 и начальное условие $\xi = 0$ при $\tau = 0$, определяют значение константы $C = C_0$ в общем решении (4). Частное решение

$$\tau_0(\xi) = \frac{1 + n_0 + K_0}{K_0 n_0 (n_0 + 1)} \cdot \frac{1}{\varphi_1}\left(\int \xi \tilde{D} d\xi + C_0\right) \qquad (7)$$

вместе с уравнением (4) описывает процесс затвердевания в кристаллизаторе.

Значение параметра $\xi = \xi_0$, при котором расчетное сечение покинет кристаллизатор, определяют из условия

$$\tau_0(\xi) = \frac{H}{\upsilon}. \quad (8)$$

2. Распределение значения коэффициента теплоотдачи в кристаллизаторе α_0 определяют по формуле:

$$\alpha = \frac{\lambda}{L(\xi)} \frac{n(T_k - T_n)}{(T_n - T_{\text{ср}})}, \quad (9)$$

где $L(\psi) = \int_0^{\psi} \sqrt{(X'_\phi)^2 + (Y'_\phi)^2}\, d\psi$.

3. Определяют толщину корки в i-секции ЗВО, для которой известно $\bar{T}_{ni}$ (i = 1, …, N). Для этого, используя заданное значение температуры поверхности i-секции ЗВО $\bar{T}_{ni}$, вычисляют значение $n_i = n(K_i)$. Из начального условия $\xi = \xi_{i-1}$ при $\tau = 0$ и общего решения (4) определяют частное решение для i-секции ЗВО

$$\tau_i(\xi) = \frac{1 + n_i + K_i}{K_i n_i (n_i + 1)} \times$$

$$\times \frac{1}{\varphi_1}\left(\int \xi \tilde{D} d\xi + C_i\right) + \tau_{i-1}(\xi_{i-1}). \quad (10)$$

Значение параметра $\xi = \xi_0$, при котором расчетное сечение i-секцию, определяют из условия

$$\tau_i(\xi) = \frac{l_i}{\upsilon}. \quad (11)$$

3. По формуле (9) определяют распределение значения коэффициента теплоотдачи в i-секции ЗВО α_i.

4. Площадь принудительно охлаждаемой поверхности заготовки в i-секции рассчитывают, исходя из условия $\alpha_i > \alpha_л$, по формуле:

$$S_i = p_i l_i, \quad (12)$$

где p_i – периметр охлаждаемого участка на поперечном сечении заготовки.

5. Расчет расхода воды в i-секции проводится по формуле:

$$G_i = g(\alpha_i) S_i. \quad (13)$$

6. Пункты 2 – 5 повторяются для каждой последующей секции ЗВО до тех пор, пока не выполнится условие $\alpha_i < \alpha_{кр}$.

Изложенный метод применили для определения режима охлаждения заготовки трефовидного сечения. Поперечное сечение заготовки и расчетная область для метода конформных отображений приведены на рис. 2.

С помощью метода конформных отображений были получены следующие расчетные формулы.

Конфигурация фронта затвердевания:

$$\begin{cases} X_\phi = \frac{4}{3} e^{-\psi} \cos\varphi - \frac{p}{3} e^{-4\psi} \cos 4\varphi, \\ Y_\phi = \frac{4}{3} e^{-\psi} \sin\varphi - \frac{p}{3} e^{-4\psi} \sin 4\varphi. \end{cases} \quad (14)$$

Длительность затвердевания:

$$\tau(\xi) = \frac{1 + n + K}{Kn(n+1)} \cdot \int \left(\frac{16}{9} \xi \left(e^{-2\xi} + p^2 e^{-8\xi} \right) + C \right) d\xi. \quad (15)$$

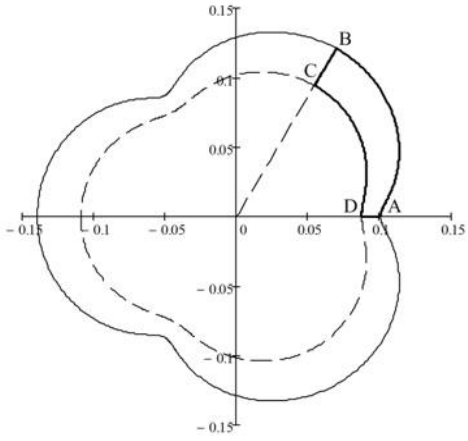


Рис. 2. Поперечное сечение трефовидной заготовки

Расчет проводили при следующих исходных данных: R = 0,09 м, $T_{\text{кр}}$ = 1500 °С, L = 260 кДж/кг, λ = = 29 Вт/(м·К), ρ = 7200 кг/м^3, c = 690 Дж/(м·К). Характеристики основных участков охлаждения приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры участков охлаждения МНЛЗ

№ п/п	Участок	Длина участка, м	$\bar{T}_{ni}$, °С
1	Кр-р	1	
2	I	0.5	1150
3	II	0.75	1075
4	III	1.25	1000
5	IV	3	950
6	V	5.5	925

Рассчитанные по приведенной методике значения коэффициентов теплоотдачи по зонам ЗВО и динамика конфигурации фронта затвердевания приведены на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что коэффициент теплоотдачи изменяется вдоль периметра заготовки. Минимальное значение достигается в точках, наиболее удаленных от центра заготовки, – выпуклая часть трефы, максимальное – в центре вогнутостей заготовки. В

секциях I – IV значение коэффициента теплоотдачи по всему периметру заготовки превосходит значение $\alpha_{кр}$, поэтому в этих секциях ЗВО требуется принудительное охлаждение всей поверхности заготовки. В секции V принудительное охлаждение выпуклой части заготовки не требуется, так как на этих участках коэффициент теплоотдачи, необходимый для поддержания заданной температуры поверхности, ниже значения $\alpha_{кр}$. Таким образом, для организации охлаждения трефовидной заготовки возможно применение схемы расстановки форсунок, приведенной на рис. 4.

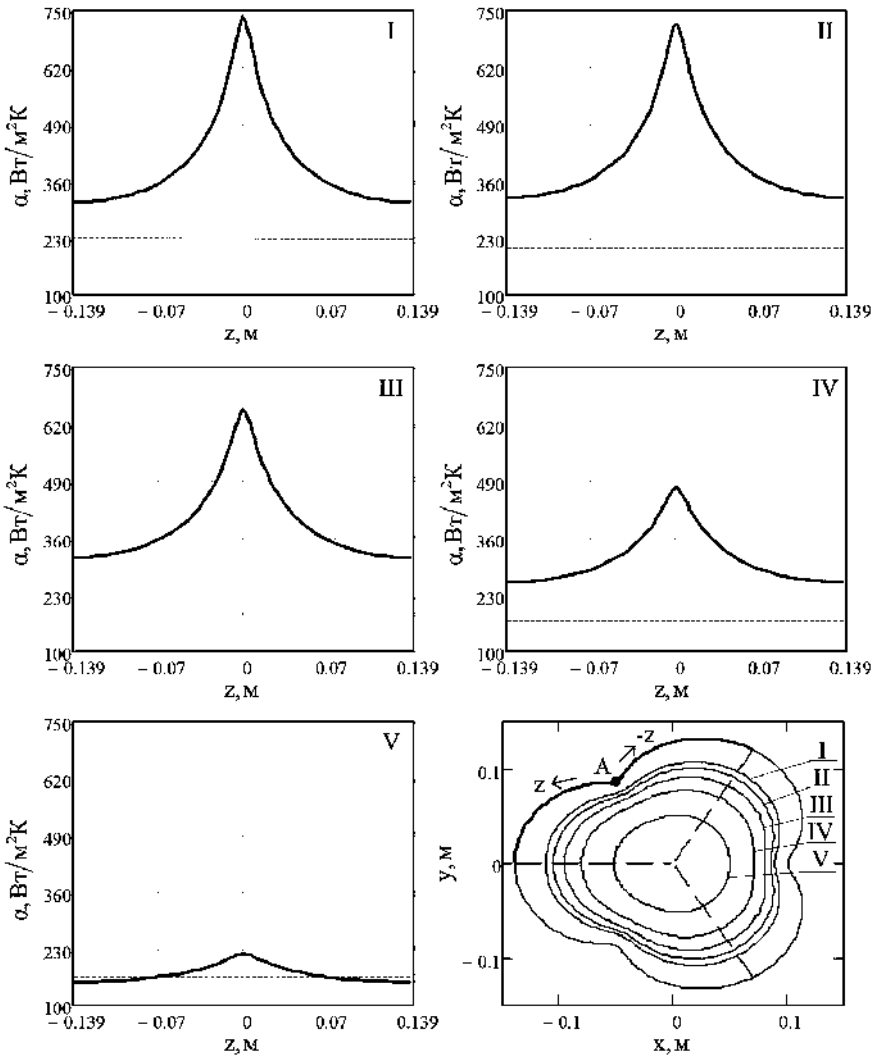


Рис. 3. Распределение коэффициента теплоотдачи α по участку периметра в секциях ЗВО и конфигурация фронтов затвердевания на границе *i*-ой секции ЗВО: I = I ÷ V – номер секции

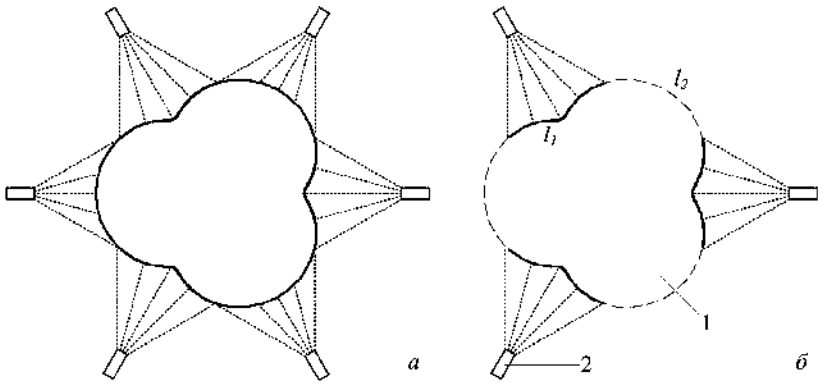


Рис. 4. Схема расположения охлаждающих форсунок в секциях ЗВО: *а* – секции I – IV; *б* – секция V; 1 – заготовка; 2 – форсунки; l_1 – участок охлаждаемый водой; l_2 – участок охлаждаемый свободной конвекцией

Результаты прогноза расхода воды по секциям ЗВО при скорости разливки v = 1 м/мин. приведены в табл. 2. Удельный расход воды рассчитывали по формуле $g = \frac{1}{60}\alpha$.

Таблица 2

Прогноз расхода воды на охлаждение трефовидного слитка при v = 1 м/мин

№ секции	l, м	p, м	S, м^2	α, Вт/м^{2}К	$\alpha_л$, Вт/м^{2}К	g, м^3/м^{2}ч	G, м^3/ч
I	0,50	0,836	0,418	462,0	180,0	4,70	1,96
II	0,75	0,836	0,627	469,2	157,3	5,20	3,26
III	1,25	0,836	1,045	447,5	136,4	5,19	5,42
IV	3,00	0,836	2,508	358,7	123,7	3,92	9,82
V	5,50	0,130	0,715	235,1	117,6	1,96	1,40

Общий по всем секциям ЗВО расход воды на охлаждение заготовки $G = \sum_i G_i$ составил 21,87 м^3/ч.

Таким образом, в работе приведена универсальная методика расчета расходов воды в ЗВО при непрерывной разливке заготовок со сложной формой поперечного сечения, которая позволяет прогнозировать длину ЗВО, количество секций, расходы воды и участки периметра охлаждаемой поверхности слитка в каждой секции ЗВО.

Литература

1. *Молочников, Н.В.* Совмещение непрерывной разливки стали и прокатки трубных заготовок / Н.В. Молочников, А.А. Целиков, А.М. Ротенберг // Сталь. – 1970. – № 5. – С. 408 – 412.

2. *Коновалов, Ю.В.* Настоящее и будущее литейно-прокатных агрегатов / Ю.В. Коновалов // Производство проката. – 2009. – № 10. – С. 36 – 48.

3. *Сивак, Б.А.* Технологические основы проектирования машин и оборудования прокатного производства: Сортовые и листовые литейно-прокатные агрегаты для металлургических мини-заводов / Б.А. Сивак. – М., 2001.

4. *Кабаков, З.К.* Инженерный способ расчета вторичного охлаждения крупного непрерывного слитка / З.К. Кабаков, В.А. Горяинов, А.Г. Подорванов, Е.А. Чесницкая // Металлургическая теплотехника. – М., 1976. – № 5. – С. 28 – 33.

5. *Павздерин, А.И.* Влияние рифлений поверхности слитка на конфигурацию его фронта затвердевания / А.И. Павздерин, З.К. Кабаков // Вестник ЧГУ. – 2011. – № 1. – С. 95 – 99.

УДК 62-6

Н.Н. Синицын, Д.А. Домрачев, В.С. Грызлов

КОНСТРУКТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПЛОТНОГО СЛОЯ БИОТОПЛИВА И ЕГО ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ

Предложена методика определения конструктивных параметров плотного слоя биотоплива. Методика расчета прогрева пластины с учетом фазового перехода влаги, теплотехническая оптимизация плотного слоя.

Плотный слой, параметры, коэффициент теплоотдачи, теплопроводность, испарение влаги, оптимизация.

The technique of determining the design parameters of the dense bed of biofuel is offered in the article. Calculation procedure of heating the plate taking into account the phase transition of moisture and heat engineering optimization of dense bed are considered in the paper.

Dense bed, parameters, coefficient of heat transfer, heat conductivity, moisture evaporation, optimization.

При расчете плотного слоя, в котором осуществляется нагрев материала, исходными данными являются: агрегатная производительность, средняя начальная $T_{пл}^{нач}$ и конечная $T_{пл}^{кон}$ температуры материала, начальная температура газов $T_{Г}^{нач}$, дисперсный состав материала и его удельная поверхность $F_{пл}^{уд}$ (на единицу массы), порозность слоя $m_{п.с.}$.

К числу управляющих параметров теплотехнического принципа плотного фильтрующего слоя относится размер куска материала d_k. Теплотехническая оптимизация плотного фильтрующего слоя по данному параметру сводится к определению оптимального значения $d_к^{опт}$, соответствующего минимальным удельным энергозатратам на процесс. С ростом d_k могут уменьшиться издержки на подготовку технологического материала, но одновременно из-за роста высоты слоя может наблюдаться повышение аэродинамического сопротивления слоя и, как следствие, рост энергозатрат на дутье. Уменьшение d_k создает более благоприятные условия для тепломассообмена в слое, но приводит к увеличению площади сечения и снижению высоты слоя, что может негативно сказаться на равномерности обработки материала, однородности качества.

Теплоэнергетическая оптимизация плотного слоя заключается в выборе таких значений его параметров, при которых обеспечивается снижение уровня удельной энергоемкости процесса. Для оценки про-