



The mechanism of heating of ingots with liquid heart, providing the increase of productivity and decrease of discharge intensity of standard coal, is investigated on the basis of mathematical modelling of the processes of solidification, cooling and heating of coarse blooming ingots as a unified combined heat technological process.

В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, Белорусский национальный технический университет,
О. В. ДУБИНА, Кабинет Министров Украины,
Э. О. ЦКИТИШВИЛИ, ОАО "Алчевский металлургический комбинат",
И. А. ТРУСОВА, Белорусский национальный технический университет,
Н. А. КИЯШКО, ОАО "Алчевский металлургический комбинат",
С. М. КОЗЛОВ, С. М. КАБИШОВ, Белорусский национальный технический университет

РАЗРАБОТКА РЕЖИМОВ НАГРЕВА НЕЗАТВЕРДЕВШИХ СЛИТКОВ МАССОЙ 9,45—13,9 т В РЕГЕНЕРАТИВНЫХ КОЛОДЦАХ ОБЖИМНОГО ЦЕХА ОАО "АЛЧЕВСКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ"

УДК 621.783.224:669.95

Разработка энергосберегающих режимов нагрева слитков и организация горячего посада (в том числе слитков с незатвердевшей сердцевиной) должны базироваться на комплексных исследованиях, включающих в себя математическое моделирование процессов затвердевания, охлаждения и нагрева, параметрическую настройку модели к конкретным производственным условиям, проведение серии численных экспериментов с целью выбора оптимальных режимов.

В продолжение ранее опубликованных работ, например [1—4], ниже приведены результаты комплексных исследований, направленных на интенсификацию режимов нагрева крупных блюминговых слитков с повышенным теплосодержанием в регенеративных нагревательных колодцах блюминга 1250 ОАО "Алчевский металлургический комбинат".

При теоретическом исследовании процессов "затвердевание в изложнице - охлаждение на воздухе - нагрев в ячейке нагревательного колодца" использована математическая модель с точки зрения рассмотрения данных процессов как совмещенного теплотехнологического процесса [2—4]. Это позволило установить закономерности нагрева слитков с жидкой сердцевиной, выявить оптимальное количество жидкого металла, обеспечивающее минимальное время нагрева.

Температурное поле в системе "слиток—изложница" для всего совмещенного технологического процесса можно описать единым дифференциальным уравнением нестационарной теплопроводности:

$$c_i(T)\rho_i(T)\frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_i(T)\frac{\partial T_i}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_i(T)\frac{\partial T_i}{\partial y} \right], \quad (1)$$

где $i=1, 2$ (1 относится к слитку, 2 — к изложнице),

$$\rho_1 = \begin{cases} \rho_{\tau}(T) & \text{при } T_1 < T_{\text{сол}}; \\ (\rho_{\tau} + \rho_{\text{ж}})/2 & \text{при } T_{\text{сол}} < T_1 < T_{\text{лик}}; \\ \rho_{\text{ж}} & \text{при } T_1 > T_{\text{лик}}; \end{cases}$$

$$\lambda_1 = \begin{cases} \lambda_{\tau}(T) & \text{при } T_1 < T_{\text{сол}}; \\ (\lambda_{\tau} + \lambda_{\text{ж}})/2 & \text{при } T_{\text{сол}} < T_1 < T_{\text{лик}}; \\ \lambda_{\text{ж}} & \text{при } T_1 > T_{\text{лик}}; \end{cases} \quad (2)$$

$$c_1 = \begin{cases} c_{\tau}(T) & \text{при } T_1 < T_{\text{сол}}; \\ c_{\tau} - L \frac{d\psi}{dT} & \text{при } T_{\text{сол}} < T_1 < T_{\text{лик}}; \\ c_{\text{ж}} & \text{при } T_1 > T_{\text{лик}}; \end{cases}$$

$\psi = (C_{\text{ж}} - C_0)/(C_{\text{ж}} - C_{\tau})$; C_0 — исходная концентрация углерода в стали.

Эффективная теплоемкость $c_{эф}$ может быть представлена полиномом второй степени относительно величины $\Theta = (T - T_{cool}) / (T_{melt} - T_{cool})$, который позволяет рассмотреть несколько простейших схем выделения удельной теплоты кристаллизации.

Зависимость коэффициентов теплопроводности, теплоемкости и плотности от температуры для затвердевшей стали взята из [5].

Сформулируем краевые условия для уравнения (1):

$$T(x, y, 0) = \begin{cases} T_{1,0} & \text{— для слитка,} \\ T_{2,0} & \text{— для изложницы.} \end{cases} \quad (3)$$

На оси симметрии

$$-\lambda_i \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad -\lambda_i \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = 0. \quad (4)$$

На границе слитка и изложницы имеется двухслойная контактная зона, состоящая из газового зазора $\delta_3 = \delta_3(t)$ и неметаллического слоя на внутренней поверхности изложницы δ_n :

$$\begin{aligned} -\lambda_1(T) \frac{\partial T_1}{\partial x} &= (T_1 - T_n) \left(\frac{\lambda_3}{\delta_3} + \alpha_n \right) = (T_n - T_2) \frac{\lambda_n}{\delta_n} = -\lambda_2(T) \frac{\partial T_2}{\partial x}, \\ -\lambda_1(T) \frac{\partial T_1}{\partial y} &= (T_1 - T_n) \left(\frac{\lambda_3}{\delta_3} + \alpha_n \right) = (T_n - T_2) \frac{\lambda_n}{\delta_n} = -\lambda_2(T) \frac{\partial T_2}{\partial y}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\alpha_n = \sigma_3(T_1 + T_n)(T_1^2 + T_n^2)$, $T_n = \frac{T_2 \lambda_n / \delta_n + T_1 (\lambda_3 / \delta_3 + \alpha_n)}{\lambda_n / \delta_n + \lambda_3 / \delta_3 + \alpha_n}$ — температура внутренней (рабочей) поверх-

ности изложницы; λ_3, λ_n — соответственно теплопроводность газового зазора и неметаллического слоя, Вт/(м·К).

При условии идеального контакта между поверхностями слитка и изложницы имеем

$$-\lambda_1(T) \frac{\partial T_1}{\partial x} = -\lambda_2(T) \frac{\partial T_2}{\partial x}, \quad -\lambda_1(T) \frac{\partial T_1}{\partial y} = -\lambda_2(T) \frac{\partial T_2}{\partial y}. \quad (6)$$

На внешних поверхностях изложницы осуществляется конвективно-радиационный теплообмен:

$$\begin{aligned} -\lambda_2(T) \left. \frac{\partial T_2}{\partial x} \right|_{x=d_x} &= \alpha_k^B (T_2 - T_c) + \sigma_B^B (T_2^4 - T_c^4), \\ -\lambda_2(T) \left. \frac{\partial T_2}{\partial y} \right|_{y=d_y} &= \alpha_k^B (T_2 - T_c) + \sigma_B^B (T_2^4 - T_c^4), \end{aligned}$$

где T_c — температура окружающей среды, К; σ_B^B — видимый коэффициент излучения, Вт/(м²·К⁴); α_k^B — коэффициент теплообмена конвекцией, Вт/(м²·К).

После "раздевания" слитка (снятия изложницы) исходное уравнение теплопроводности (1) дополнится краевыми условиями, соответствующими охлаждению на воздухе и нагреву в печи:

$$\begin{aligned} -\lambda_1(T) \frac{\partial T_1}{\partial x} &= \begin{cases} \alpha_k^B (T_1 - T_c) + \sigma_B^B (T_1^4 - T_c^4) & \text{— при охлаждении на воздухе,} \\ \alpha_k^{печ} (T_{печ} - T_1) + \sigma_B^{печ} (T_{печ}^4 - T_1^4) & \text{— при нагреве в печи,} \end{cases} \\ -\lambda_1(T) \frac{\partial T_1}{\partial y} &= \begin{cases} \alpha_k^B (T_1 - T_c) + \sigma_B^B (T_1^4 - T_c^4) & \text{— при охлаждении на воздухе,} \\ \alpha_k^{печ} (T_{печ} - T_1) + \sigma_B^{печ} (T_{печ}^4 - T_1^4) & \text{— при нагреве в печи,} \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

где $T_{печ} = T_{печ}(t)$ — температура рабочего пространства, К; $\alpha_k^B, \alpha_k^{печ}$ — коэффициенты теплообмена конвекцией при охлаждении соответственно на воздухе и нагреве в печи, Вт/(м²·К); $\sigma_B^B, \sigma_B^{печ}$ — коэффициенты лучистого теплообмена при охлаждении соответственно на воздухе и нагреве в печи, Вт/(м²·К⁴).

Коэффициенты внешнего теплообмена α и σ при нагреве слитка в ячейке нагревательного колодца рассчитывали по методике, приведенной в [6].

При расчете затвердевания слитка важным является вопрос определения теплоотдачи от поверхности слитка к изложнице через газовый зазор. В данном случае представляется целесообразным

воспользоваться рекомендациями В. А. Ефимова [7], согласно которым имеется определяющее соотношение между усадкой застывшей корки слитка и ее пластической деформацией, а также собственным расширением материала изложницы.

При этом величину зазора δ_z находили из условия:

$$\delta_z = \epsilon_{ус} - \epsilon_{пл.д} + \epsilon_{изл.р}$$

где $\epsilon_{ус} = 0,5\epsilon_1 D \Delta T$ — усадка слитка; α_1 — линейный коэффициент усадки в области температур затвердевания, град $^{-1}$; $D = 2R$ — поперечный размер слитка, м; ΔT — разность температур между жидким ядром и поверхностью слитка, К; $\epsilon_{пл.д}$ — пластическая деформация корки слитка.

Момент образования газового зазора фиксируется при появлении твердой корки, способной выдержать ферростатическое давление жидкого металла. В соответствии с рекомендациями [8] величина твердой корки при пересчете на размер слитка должна составлять 0,15—0,17 $R_{ст}$.

Параметрическую настройку математической модели (1)—(8) осуществляли по данным промышленного эксперимента, проведенного в условиях Днепропетровского металлургического комбината им. Дзержинского для слитка осевой стали поперечным сечением 0,736×0,655 м, массой 8 т, сталь — среднеуглеродистая (сталь 45) [1, 2]. Анализ сравнения расчетных и экспериментальных температур в характерных точках сечения слитка (в центре и на поверхности) показал удовлетворительное согласование (максимальное расхождение не превышает 3—4%). На основании математической модели процессов затвердевания, охлаждения и нагрева разработан программный продукт, который использован для проведения расчетов с целью поиска оптимальных режимов нагрева слитков с незавершенным процессом затвердевания.

Расчеты проводили при следующих исходных данных: топливо в период нагрева — коксодоменная смесь с теплотой сгорания $Q_p^н = 5000$ кДж/м 3 ; топливо в период томления — доменный газ с теплотой сгорания $Q_p^т = 3770$ кДж/м 3 ; количество слитков: массой 9,45 т — 8 шт.; массой 10,55 и 13,9 т — 6 шт.; коэффициент избытка воздуха в процессе нагрева поддерживали в соответствии с технологической инструкцией.

Цель проведения расчетов — поиск рациональных температурно-тепловых режимов нагрева слитков, обеспечивающих необходимый по технологическим условиям температурный перепад между центром и поверхностью слитка, а также условия полного затвердевания слитка в процессе пребывания его в ячейке регенеративного колодца.

На первом этапе с использованием программного продукта, разработанного на основе математической модели совмещенного процесса, просчитали существующие режимы нагрева слитков с повышенным теплосодержанием с целью определения фактического температурного поля и величины жидкой сердцевины в момент посада слитка в ячейку нагревательного колодца. Время прохождения слитка от момента разливки до посада в ячейку колодца и режимы нагрева слитка выбирали в соответствии с действующей технологической инструкцией. В качестве примера на рис. 1 приведено изменение температур в характерных точках сечения слитка массой 9,45 т в совмещенном процессе "затвердевание в изложнице — охлаждение на воздухе — нагрев в колодце". В данном случае осуществляется посад слитков с жидкой сердцевиной ($\phi = 25\%$).

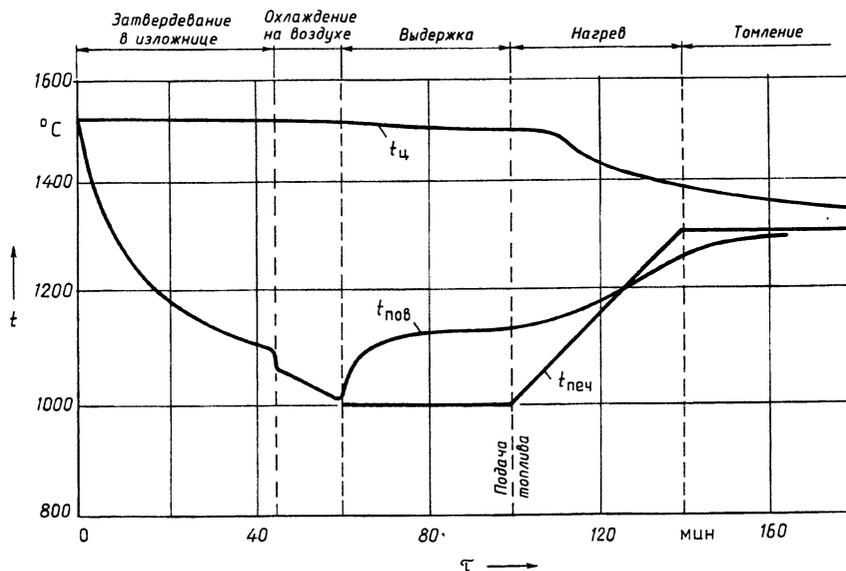


Рис. 1. Изменение температуры в характерных точках сечения слитка массой 9,45 т, сталь 3 при затвердевании и нагреве по заводскому режиму (посад слитков с жидкой сердцевиной $\phi = 25\%$)

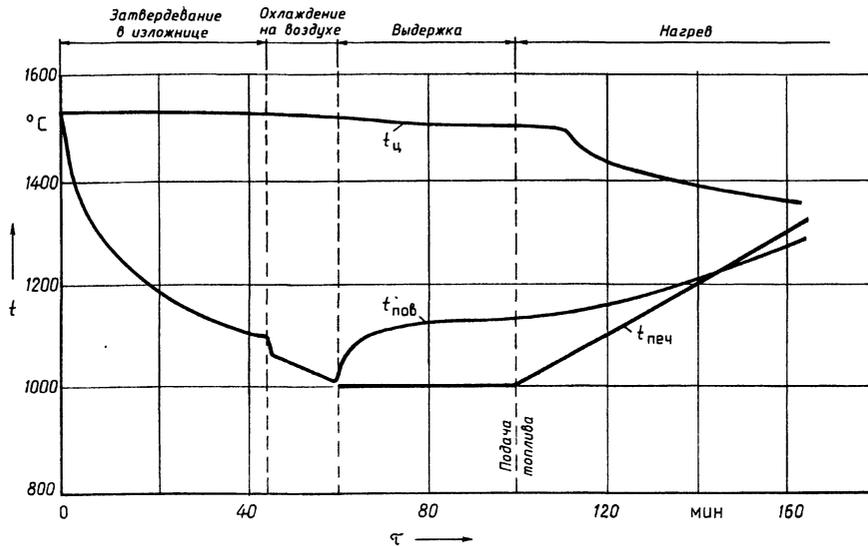


Рис. 2. Изменение температуры в характерных точках сечения слитка массой 9,45 т, сталь 3 при затвердевании и нагреве по предлагаемому режиму (посад слитков с жидкой сердцевиной $\phi = 25\%$)

На втором этапе с помощью программного продукта проведен выбор рациональных температурно-тепловых режимов, обеспечивающих интенсификацию процесса нагрева. На примере нагрева слитков массой 9,45 т с количеством жидкой сердцевины $\phi = 25\%$ показано, что целесообразно осуществлять режим нагрева без последующей выдержки (рис. 2), при этом продолжительность нагрева за счет изменения скорости подъема температуры ячейки сокращается на 15–20 мин по сравнению с существующим заводским режимом.

На основании проведенных исследований разработаны рациональные температурно-тепловые режимы регенеративных колодцев, обеспечивающие снижение удельного расхода условного топлива и повышение производительности колодцев:

Для слитков 9,3Н (7–8 шт.)

Температура посадки, °С	1060	1040	1020	1000	975	950
Общее время нагрева, ч-мин	2-00	1-55	1-50	1-45	1-30	2-00
	1-45	1-40	1-35	1-30	0-55	1-05
Выдержка без топлива, ч-мин	0-40	0-35	0-30	0-20	–	–
	0-40	0-35	0-30	0-20	–	–
Томление, ч-мин	0-40	0-40	0-40	0-40	0-40	1-20
	–	–	–	–	–	–

Для слитков Д-10 (7–8 шт.)

Температура посадки, °С	1050	1025	1000	985	975	950
Общее время нагрева, ч-мин	3-15	2-45	2-20	2-05	2-10	2-30
	2-50	2-25	2-00	1-15	1-20	1-30
Выдержка без топлива, ч-мин	0-45	0-30	0-20	–	–	–
	0-45	0-30	0-20	–	–	–
Томление, ч-мин	1-20	1-20	1-20	1-20	1-20	1-20
	–	–	–	–	–	–

Для слитков 13,8С (5–6 шт.)

Температура посадки, °С	1100	1080	1070	1060	1050	1025	1000
Общее время нагрева, ч-мин	3-50	3-30	3-10	2-40	2-30	2-50	2-55
	3-20	3-00	2-45	2-20	1-30	1-45	1-50
Выдержка без топлива, ч-мин	0-50	0-40	0-25	0-15	–	–	–
	0-50	0-40	0-25	0-15	–	–	–
Томление, ч-мин	1-40	1-40	1-40	1-40	1-40	1-40	1-40
	–	–	–	–	–	–	–

* В числителе приведен существующий режим, в знаменателе — предлагаемый.

Разработанные режимы нагрева слитков массой 9,45—13,9 т с повышенным теплосодержанием апробированы в условиях обжимного цеха ОАО "Алчевский металлургический комбинат", по результатам испытаний осуществлены расчеты тепловых балансов по существующим и предлагаемым температурно-тепловым режимам. В качестве примера в таблице приведены результаты расчета теплового баланса при нагреве слитка массой 9,45 т (сталь 3) с незатвердевшей сердцевиной ($\phi = 25\%$).

Тепловой баланс камеры за весь процесс нагрева слитков*

Статья прихода	Приход теплоты		Статья расхода	Расход теплоты	
	10 ⁶ кДж	%		10 ⁶ кДж	%
Горение топлива	6,52/5,47	57,7/59,0	Теплота металла	0,36/-	3,2/0
Окисление железа	0,96/0,96	8,5/10,4	Теплота с окалиной	0,04/0,04	0,4/0,4
Физическая теплота газа	2,17/1,48	19,2/1,0	Тепловые потери рабочей камеры	4,6/4,82	41,4/51,8
Физическая теплота воздуха для горения топлива	1,65/1,36	14,6/14,6	Теплота продуктов горения топлива	6,12/4,44	55,0/47,8
Итого	11,3/9,27	100/100	Итого	11,12/9,3	100/100
Удельный расход топлива $b = 6,1/4,4$ кг у.т/т, производительность камеры $P = 37,8/43,2$ т/ч					

* В числителе приведен действующий режим, в знаменателе — предлагаемый.

Из таблицы видно, что при нагреве слитков с повышенным теплосодержанием (с жидкой сердцевиной $\phi = 25\%$) по предлагаемому режиму топливо расходуется практически только на компенсацию тепловых потерь рабочей камеры и с уходящими газами, а нагрев слитка осуществляется за счет внутреннего теплосодержания и скрытой теплоты кристаллизации стали.

Аналогичные расчеты проведены для всего марочного сортамента и типоразмера слитков, производимых в условиях ОАО "Алчевский металлургический комбинат". Установлено, что в зависимости от массы слитков, марки стали и количества жидкой сердцевины в момент посадки в ячейку нагревательного колодца удельный расход условного топлива снижен на 1—5 кг у.т/т. Экономический эффект от внедрения разработанных температурно-тепловых режимов в условиях обжимного цеха ОАО "Алчевский металлургический комбинат" составил 48 тыс. у.е. в год.

Литература

1. Тимошпольский И. С., Тимошпольский В. И., Шендрик Б. Ф. и др. Закономерности нагрева слитков горячего посада // Сталь. 1989. № 9.
2. Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Несенчук А. П., Бродский С. С. и др. Промышленные теплотехнологии. Моделирование нелинейных процессов. Учеб. Ч. 5. / Мн.: Выш. шк., 2000.
3. Анисимов Л. А., Тимошпольский В. И., Трусова И. А. и др. Совершенствование режимов нагрева слитков в регенеративных колодцах блюминга 1150 // Сталь. 1999. № 7.
4. Голубченко А. К., Тимошпольский В. И., Бродский С. С. Тепловой режим слитка на участке разлива-охлаждение-нагрев (совмещенный процесс моделирования) // Металлургия и литейное производство. Мн.: Беларуская навука. 1998.
5. Маковский В. А. Эмпирические формулы для выражения температурной зависимости теплофизических свойств стали // Сталь. 1972. № 1.
6. Расчеты нагревательных печей / С. И. Аверин, Э. М. Гольдфарб, Б. Л. Кравцов и др.; Под ред. Н. Ю. Тайца. Киев: Техника, 1969.
7. Ефимов В. А. Разливка и кристаллизация стали. М.: Металлургия, 1976.
8. Ефимов В. А. Стальной слиток. М.: Металлургия, 1961.