



The basic results of solving of problems of melting, hardening and heating of metal with regard to the modern metallurgical production at the example of RUP «BMZ» are given.

В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, И. А. ТРУСОВА, П. Э. РАТНИКОВ, Д. В. МЕНДЕЛЕВ, БНТУ

УДК 669.04

ЭФФЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЙ В МЕТАЛЛУРГИИ

Анализ существующих литературных источников, производственного опыта функционирования металлургических агрегатов, а также исследования высокотемпературных процессов, выполненные в НИЛ «Теория и техника металлургических процессов» Белорусского национального технического университета, показали, что одним из наиболее эффективных методов решения задач повышения качества металлопродукции, увеличения производительности агрегатов, создания энерго- и материалосберегающих режимов является комплексный подход, базирующийся на чередовании экспериментальных и теоретических исследований [1–5 и др.].

Существующие математические модели, применяемые для расчетов тепло- и массообменных процессов в металлургических агрегатах, можно в первом приближении разбить на три основных класса.

1. Гносеологические модели, целью которых является выявление качественных закономерностей процесса, недоступных прямым экспериментальным исследованиям.

2. Модели для оптимизации или выбора наиболее рациональных технологических режимов и конструкций оборудования. Учет сложных физических процессов в этом классе моделей осуществляется путем введения эффективных параметров.

3. Модели для автоматического управления технологическими объектами.

Общеизвестно, что методы анализа процессов затвердевания, плавления и тепловой обработки слитков и заготовок должны базироваться на математической модели, которая в общем случае описывается уравнением теплопроводности с нелинейностью I рода (зависимость теплофизических свойств от температуры), II рода (нелинейность граничных условий) и III рода (учет скрытой те-

плоты фазового перехода). Следует отметить, что фазовые превращения, учет которых вызывает при решении задач теплообмена наибольшие трудности, для большинства промышленных сплавов (сталь, чугун, черные и цветные сплавы) происходят в интервале температур (в отличие от чистых металлов).

Для решения таких задач используются различные методы и подходы, среди которых можно отметить точные методы решения, применяемые, как правило, в случае линейных задач для тел простой геометрии [6–11]. Однако чрезвычайная сложность большинства имеющихся точных решений, а также упрощения и допущения при постановке математической модели процесса создают существенные трудности для их успешного практического применения.

В настоящее время при решении математических моделей, описывающих процессы затвердевания, охлаждения и нагрева металлов и сплавов, существуют два основных подхода.

1. Использование численных методов (например, методы конечных разностей, конечных элементов), а также применение готовых программных продуктов (например, FemLab Comsol Multiphysics и др.).

2. Применение приближенных методов решения задач теплопроводности (данный путь получил развитие в работах [12–23]).

Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки, область применения решения. Так, применение численных методов и современных ЭВМ (в том числе суперкомпьютеров) предоставляет исследователю возможность осуществить численное моделирование достаточно сложных физико-химических и теплофизических явлений, сопровождающих процессы кристаллизации, затвердевания, охлаждения, нагрева слит-

ков и заготовок перед пластической деформацией. Вместе с тем, во многих случаях решение математической задачи, учитывающей переменность технологических факторов, конструктивные особенности агрегата, сложные физико-химические и тепло-массообменные процессы, зачастую сталкивается с такими вопросами, как трудность использования для оценочных расчетов, сходимость, устойчивость решения и оценка погрешности, большие затраты на отладку программы и проведение расчетов, необходимость использования современных суперкомпьютеров, а также сложность обобщения полученных результатов и установления закономерностей процессов именно в виду большого числа учитываемых параметров.

В случае, когда, например, необходимо выполнить оперативные расчеты процессов теплообмена, оценку влияния различных факторов на закономерности внешнего и внутреннего теплообмена, высокая точность решения нелинейных задач, достигаемая при численной реализации, оказывается излишней.

В связи с отмеченным для решения нелинейных задач теплопроводности применительно к высокотемпературным металлургическим агрегатам по-прежнему остаются актуальными вопросы разработки и совершенствования упрощенных (инженерных) методов расчета плавления металла, затвердевания слитков и заготовок и нагрева их перед пластической деформацией.

Преимущества приближенных методов состоят в следующем:

- конечный вид приближенного решения, с одной стороны, значительно проще аналитического, а с другой – точнее первого члена ряда, входящего в точное решение;
- приближенный метод нередко позволяет учесть достаточно большое число параметров;
- приближенные методы позволяют решать целый ряд прикладных нелинейных задач.

Кроме того, полученные закономерности процессов тепло- и массообмена в металлургических агрегатах могут быть использованы в дальнейшем при решении более сложных задач, которые будут реализованы численными методами.

Одним из приближенных методов решения нелинейных задач теплопроводности, который достаточно надежно зарекомендовал себя с теоретической и практической точки зрения, является метод эквивалентных источников (МЭИ). Ранее показаны приемы использования МЭИ для решения задач затвердевания крупнотоннажных слитков в изложницах [24, 25], нагрева металла в методических печах толкательного типа [26], определе-

ния термических напряжений в нагреваемых заготовках и слитках и т. д. Основные результаты решения задач теплопроводности на базе МЭИ обобщены в работах [2, 3, 18, 27–31 и др.].

В данной работе приведены основополагающие результаты решения задач плавления, затвердевания и нагрева металла применительно к современному металлургическому производству на примере РУП «БМЗ», включая затвердевание непрерывнолитых заготовок, что позволяет прогнозировать продолжительность кристаллизации с целью выбора конструктивных параметров машин непрерывного литья заготовок различного типа; процессы «нагрев–плавление» металла для определения рациональных режимов загрузки металлошхты при плавке в дуговых сталеплавильных печах; нагрев стальных слитков и заготовок в печах различного технологического и конструктивного назначения; расчеты термических напряжений и деформаций с целью выбора рациональных технологий нагрева, обеспечивающих качество металлопродукции.

Методика расчета затвердевания металла.

Исследование процесса симметричного затвердевания слитков плоской, цилиндрической и сферической формы с начальным перегревом расплава ($T_0 > T_{\phi}$) сводится к решению следующей краевой задачи:

$$\frac{1}{(1-\xi)^m} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[(1-\xi)^m \frac{\partial \theta_j}{\partial \xi} \right] = K_a^{2-j} \frac{\partial \theta_j}{\partial \tau}, \quad j=1, 2, \quad (1)$$

$$\left. \frac{\partial \theta_1}{\partial \xi} \right|_{\xi=0} = \text{Bi}_1 \theta_1(0, \tau),$$

$$\theta_j(\xi, \tau) \Big|_{\xi=\ell(\tau)} = 1, \quad \left. \frac{\partial \theta_j}{\partial \xi} \right|_{\xi=1} = 0. \quad (2)$$

Начальное условие затвердевания, которое определяет распределение температуры по сечению слитков и заготовок в момент начала кристаллизации:

$$K_a \text{Kол}(\tau) = \sum_{j=1}^2 (K_{\lambda} K_T)^{j-1} \left. \frac{\partial \theta_j}{\partial \xi} \right|_{\xi=\ell(\tau)},$$

$$\theta_2(\xi, \tau_0^0) = \varphi(\xi), \quad (3)$$

где введены температурные симплексы затвердевшей оболочки ($j=1$) [$0 \leq \xi \leq \ell(\tau)$] и жидкой сердцевины ($j=2$) [$\ell(\tau) \leq \xi \leq 1$]:

$$\theta_1(\xi, \tau) = \frac{T_1(\xi, \tau) - T_c}{T_{\phi} - T_c}, \quad \theta_2(\xi, \tau) = \frac{T_0 - T_2(\xi, \tau)}{T_0 - T_{\phi}}. \quad (4)$$

Полученная методика расчета затвердевания и охлаждения слитков впервые распространена на случай затвердевания и охлаждения заготовки в условиях непрерывной разливки на МНЛЗ для условий РУП «БМЗ».

Опуская математические выкладки, запишем решение задачи (1)–(3) с помощью МЭИ:

$$\theta_1(\xi, \tau) = \theta_1^*(\xi, \tau) - \frac{f_1(\tau)}{2(1+m)} \left\{ \left[(1-\xi)^2 - \frac{2+Bi_1}{Bi_1} \right] - \left[(1-\ell(\tau))^2 - \frac{2+Bi_1}{Bi_1} \right] \theta_1^*(\xi, \tau) \right\},$$

$$\theta_1^*(\xi, \tau) = \frac{(1-m) + Bi_1 \left[1 - (1-\xi)^{1-m} \right]}{(1-m) + Bi_1 \left\{ 1 - [1-\ell(\tau)]^{1-m} \right\}},$$

$$\theta_2(\xi, \tau) = 1 - \frac{f_2(\tau)}{2(1+m)} \left\{ (1-\xi)^2 - [1-\ell(\tau)]^2 \right\},$$

где

$$f_1(\tau) = \frac{2Bi_1 K_a [1-\ell(\tau)] \left[6 + 3Bi_1 \ell(\tau) - Bi_1 \ell^2(\tau) \right] \dot{\ell}(\tau)}{3 \left\{ 2[1 + Bi_1 \ell(\tau)] - Bi_1 \ell^2(\tau) \right\}^2},$$

$$f_2(\tau) = -\frac{4}{3} (1 - \varphi_{\text{п}}) \dot{\ell}(\tau).$$

Результаты расчетов (рис. 1) показали, что относительная погрешность вычислений по приведенной методике в сравнении с использованием численных методов для процессов непрерывной разливки не превышает 6%, при вычислении температуры – 3,5%.

Полученные результаты в дальнейшем были использованы при разработке и выдаче рекоменда-

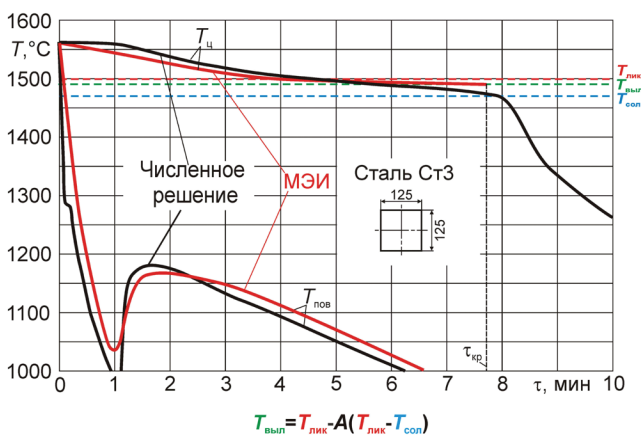


Рис. 1. Сравнение результатов расчета затвердевания непрерывнолитой заготовки сечением 125×125 мм из стали Ст3, рассчитанных с помощью МЭИ, с данными численного моделирования

ций по выбору конструктивных и технологических параметров МНЛЗ различной конструкции.

Необходимо отметить, что достоинством предложенной методики является то, что в конкретном случае, задаваясь временем и условиями теплообмена, можно определять положение фронта кристаллизации и рассчитывать температурные поля. Это позволяет исследовать закономерности затвердевания непрерывнолитой заготовки в зависимости от скорости разливки и условий охлаждения.

Разработка методики расчета процессов «нагрев-плавление» металла. Одним из основных критериев оценки качества работы плавильных печей является продолжительность плавки. При исследовании процессов расплавления теплофизические характеристики металла обычно принимаются постоянными величинами. Кроме того, в большинстве исследований считается, что плавление металла протекает при неизменном поверхностном тепловом потоке. Между тем, зависимость теплофизических характеристик металла от температуры (\$\lambda(T)\$, \$c(T)\$), а также поверхностного теплового потока \$q_{\text{п}}(t)\$ от времени может оказать довольно существенное влияние на динамику процесса «нагрев-плавление».

Для учета термической чувствительности стали примем линейную зависимость теплофизических параметров от температуры:

$$\lambda(T) = \lambda_0 + \delta_{\lambda}(T - T_0) = \lambda_0(1 + \varepsilon_{\lambda}\theta),$$

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{\delta_{\lambda}}{\lambda_0}(T_{\text{ф}} - T_0),$$

$$C(T) = C_0 + \delta_c(T - T_0) = C_0(1 + \varepsilon_c\theta),$$

$$\varepsilon_c = \frac{\delta_c}{C_0}(T_{\text{ф}} - T_0).$$

Предположим также, что расплав непрерывно удаляется с поверхности тела, растворяясь в общей массе жидкого металла.

Для исследования процесса нагрева и плавления термомассивного куска металла с переменными теплофизическими параметрами рассмотрена математическая модель, включающая дифференциальное уравнение теплопроводности:

$$\frac{1}{\rho^m} \frac{\partial}{\partial \rho} \left[\rho^m (1 + \varepsilon_{\lambda}\theta_j) \frac{\partial \theta_j}{\partial \rho} \right] = (1 + \varepsilon_c\theta_j) \frac{\partial \theta_j}{\partial \tau} \quad (6)$$

с крайними условиями:

на стадии предварительного нагрева (\$j = 1, 2\$) (\$0 \le \tau \le \tau_2\$; \$0 \le \rho \le 1\$):

$$(1 + \varepsilon_{\lambda}\theta_2) \frac{\partial \theta}{\partial \rho} \Big|_{\rho=1} = Ki(\tau), \quad \frac{\partial \theta}{\partial \rho} \Big|_{\rho=0} = 0, \quad \theta_2(\rho, 0) = 0; \quad (7)$$

стадии плавления ($j = 3$) $\tau_2 \leq \tau \leq \tau_3 = \tau_\phi$, $0 \leq \rho \leq \beta_3(\tau) \leq 1$:

$$(1 + \varepsilon_\lambda \theta_3) \frac{\partial \theta_3}{\partial \rho} \Big|_{\rho=\beta_3(\tau)} = Ki(\tau) + Ko\dot{\beta}_3(\tau),$$

$$\frac{\partial \theta_3}{\partial \rho} \Big|_{\rho=1} = 0, \quad \theta_3(\rho, \tau) \Big|_{\rho=\beta_3(\tau)} = 1. \quad (8)$$

При применении МЭИ процесс плавления разбиваем на три этапа: 1) инерционный, когда температурные возмущения достигнут центра; 2) регулярный, когда происходит нагрев тела по всему сечению; 3) период расплавления.

Разработанная методика расчета процессов «нагрев-плавление» кускового материала (металлошихты) использована при определении времени плавления различных видов металлошихты в расплаве жидкой стали, в том числе с целью определения оптимальной скорости загрузки шихты (например, при определении расхода металлизированных окатышей), оптимального соотношения различных компонентов металлошихты.

Некоторые результаты расчетов влияния переменности теплофизических характеристик материала и теплового потока на продолжительность процесса «нагрев-плавление» кускового материала в расплаве при использовании брикетов из легированной стружки (на примере ШХ15СГ) приведены на рис. 2, 3.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что с целью эффективного использования холодно- и горячебрикетированных брикетов необходимо создание наиболее оптимальных условий их расплавления в процессе выплавки в дуговых сталеплавильных печах. На основании этого предложен следующий вариант загрузки в ДСП большой емкости брикетов: 50% брикетов использовать в пе-

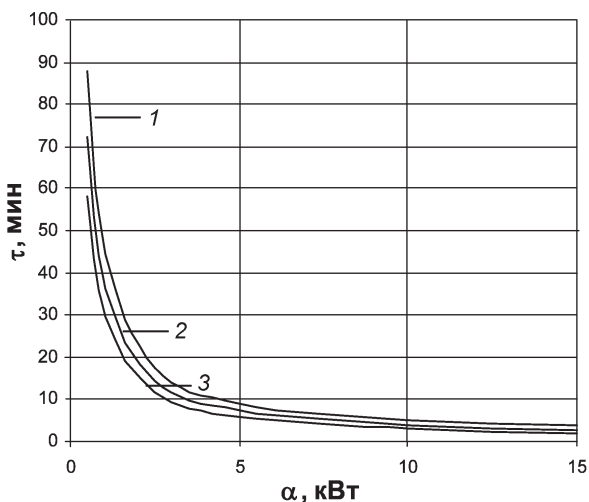


Рис. 2. Зависимость времени плавления брикетов от условий теплообмена: 1 – 48 мм; 2 – 40; 3 – 32 мм

риод загрузки печи, при этом располагать их в центральной части загрузочной бадьи, чтобы они оказались близкорасположенными к зоне горения дуг, оставшуюся часть брикетов (около половины брикетов, применяемых в металлозавалке) загружать в период подвалки. С учетом существующих рекомендаций по выплавке стали в 100-тонных дуговых печах РУП «БМЗ» об использовании в металлошихте брикетов в количестве 10–12% от массы металлошихты в период завалки необходимо подавать около 6 т брикетированной стружки, в период подвалки – 6 т.

Выданные рекомендации использованы при разработке и внедрении на РУП «БМЗ» технологии производства легированных и углеродистых марок стали с применением в составе металлошихты брикетированной стружки.

Разработка рациональных режимов нагрева металла в нагревательных проходных печах прокатного производства. Очевидно, что минимальное время нагрева заготовок в проходной печи может быть достигнуто при максимальном расходе топлива, который определяется исходя из возможностей горелочных устройств. В этом случае скорость нагрева будет максимальной и, как следствие, температурный перепад по сечению заготовки будет наибольшим. Это может привести к нежелательному увеличению времени выдержки для выравнивания температурного поля по сечению и, как следствие, к увеличению окалинообразования, а также к росту термонапряжений в нагреваемом металле. Исходя из схемы термического слоя [2, 18], максимальный температурный перепад по сечению заготовок возникает в момент окончания инерционного этапа, что может привести к превышению термическими напряжениями предела прочности заготовки, и следовательно, к ее разрушению. Таким образом, в начальный пе-

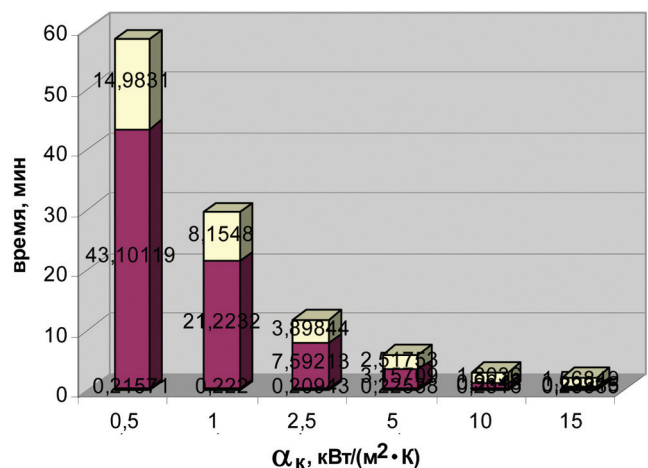


Рис. 3. Продолжительность каждого этапа процесса прогрева-нагрева-плавления

риод нагрева следует уменьшать тепловую нагрузку на заготовки (снижать тепловые потоки) и монотонно нагревать металл с минимально возможной температурой греющей среды (наименьшим расходом топлива) до достижения температуры фазовых переходов, а затем осуществлять форсированный нагрев до требуемой температуры. Это приведет к уменьшению расхода топлива за счет увеличения производительности и более полной передачи теплоты от уходящих газов металлу в методической зоне. К тому же металл меньшее время будет находиться при высоких температурах, где он интенсивно окисляется, что снизит величину окалинообразования. Очевидно, что такой режим является оптимальным не только с точки зрения топливопотребления, но и окалинообразования, что подтверждают результаты исследований [1].

Постановка задачи нагрева длинной квадратной призмы сечением $2H \times 2H$ с начальной температурой T_0 в условиях противоточного теплообмена:

$$a \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x_2^2} \right] = \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (9)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \Big|_{x_i=H} = \alpha [T_r(t) - T(x_1, x_2, t)] \Big|_{x_i=H_i}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x_i} \Big|_{x_i=0} = 0,$$

$$V_r c_r \tau \frac{\partial T_r}{\partial t} = \alpha(t) [T_r(t) - \bar{T}_n(t)] 2A - c_r (T_{гор} - T_r(t)) \left| \frac{dV(\tau)}{dt} \right|, \quad (11)$$

$$T(x_1, x_2, t = 0) = T' = T_0 = \text{const}; \quad (12)$$

$$T_r(t = 0) = T_r'' = \text{const}.$$

Величина термических напряжений определяется по формуле

$$\sigma^{(0)} = K_\sigma \frac{l(\tau)}{\varepsilon_\lambda} \left[\frac{1}{2} (1 - 2A + 3,75B) (\psi_0 - 2 + F_0^{(0)}) + \left(\frac{1}{3} A - B \right) V_0^{(0)} l(\tau) + \frac{1}{4} B (\psi_0^3 - 1) \right], \quad (0 \leq \xi \leq \beta(\tau)),$$

при условии $l(\tau_0) = 1$:

$$\sigma_p^{\max} = \frac{K_\sigma}{\varepsilon_\lambda} \left[\frac{1}{2} (1 - 2A + 3,75B) (\psi_0^{(0)} - 2 + F_0^{(0)}) + \left(\frac{1}{3} A - B \right) V_0^{(0)} + \frac{1}{4} B (\psi_0^{(0)3} - 1) \right], \quad (13)$$

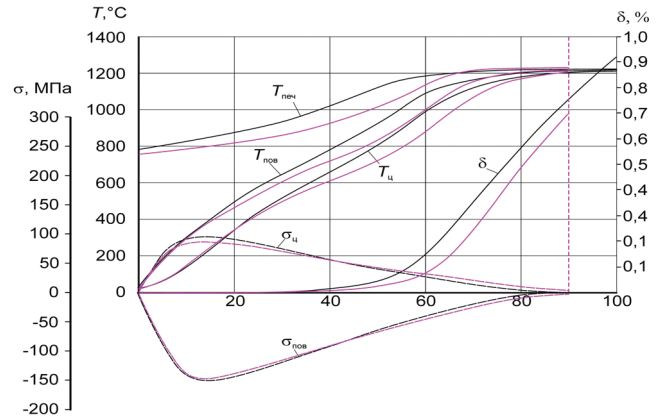


Рис. 4. Сравнение заводского и предлагаемого (форсированного) режимов нагрева углеродистых марок сталей (на примере стали Ст3) в печи стана 320: — — — заводской режим; - - - - предлагаемый режим

где $\psi_0^{(0)} = \sqrt{1 + V_0^{(0)}}$; $V_0^{(0)} = \varepsilon_\lambda (2 + \varepsilon_\lambda)$ из условия $T(R, t) = T_c = \text{const}$; $V_0^{(0)} = \text{Ki}^*$ — из условия $\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=l} = q = \text{const}$; $V_0^{(0)} = \text{Bi}(1 + \varepsilon_\lambda)(1 + \text{Bi}^*) \times$

$$\left[1 - \sqrt{1 - \frac{\varepsilon_\lambda^*}{(1 + \text{Bi}^*)^2}} \right] \text{ — из условия } \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=l} = \alpha_k [T_c - T(R, t)]; F_0^{(0)} = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{V_0^{(0)}}} \text{Arsh} \sqrt{V_0^{(0)}}, (\varepsilon_\lambda > 0); \\ \frac{1}{\sqrt{-V_0^{(0)}}} \arcsin \sqrt{-V_0^{(0)}}, (\varepsilon_\lambda < 0). \end{cases}$$

Опуская математические выкладки в виду их громоздкости, приведем в качестве примера некоторые результаты исследований процессов нагрева в печах современной конструкции для условий РУП «БМЗ».

Нагревательная печь непрерывного мелко-сортного стана 320 РУП «БМЗ». На рис. 4 показано сравнение динамики температур и термических напряжений в характерных точках сечения при нагреве непрерывнолитых заготовок из стали Ст3 в печи стана 320 по заводскому режиму (согласно действующей заводской инструкции) и предлагаемому режиму. Анализируя динамику температурных напряжений по заводскому режиму (рис. 4), можно сделать вывод, что своего максимума температурные напряжения достигают на 7-й минуте нагрева, и хотя величины возникающих термонапряжений не превышают предела прочности, тем не менее, их скачок (с учетом остаточных термических напряжений) может привести к росту трещин и дальнейшему развитию дефектов, образовавшихся в заготовке при

непрерывной разливке (например, горячих трещин).

Предложенный режим нагрева предполагает снижение температуры в методической и первой сварочной зонах и повышение во второй сварочной зоне, когда металл уже достиг пластичного состояния. За счет снижения температуры в первой сварочной зоне уменьшается температурный перепад по сечению заготовки и, как следствие, термонапряжение. Если в соответствии с действующей технологической инструкцией температуру в конце второй сварочной зоны повысить до 1240 °С, то время нагрева сокращается до 87–90 мин. При этом удельный расход условного топлива снижается на 0,62 кг у. т./т по сравнению с заводским. Кроме того, так как заготовка меньше находится в зоне высоких температур, процесс окалинообразования протекает менее интенсивно (количество окалины уменьшается на 1,07 кг/т). Производительность печи достигает 123 т/ч, что на 7,4% выше показателя, достигаемого при заводском режиме.

Разработка рациональных режимов нагрева непрерывнолитых заготовок в нагревательной печи стана 150 РУП «БМЗ». Большую часть сортамента стана 150 составляют кордовые марки стали, поэтому основное внимание уделено разработке форсированного режима нагрева кордовых сталей (на примере 70К). Так, при нагреве по заводскому режиму удельный расход условного топлива находится на уровне 38,22 кг у. т./т при производительности 72,35 т/ч, расчетное количество окалины – 0,61% (рис. 5), при использовании предлагаемого режима производительность возрастает на 6,2% при удельном расходе условного

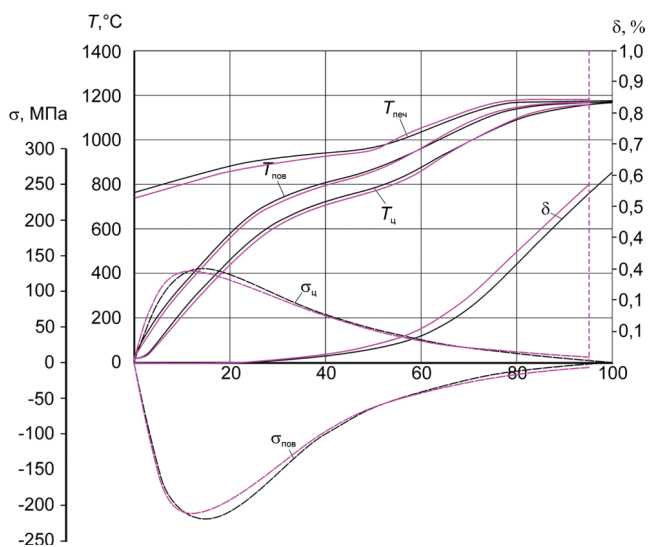


Рис. 5. Сравнение нагрева высокоуглеродистых марок сталей (на примере 70К) по заводскому и форсированному режимам нагрева: — — заводской режим; - - - - предлагаемый режим

топлива 37,9 кг у. т./т, окалинообразование уменьшается до 0,58%.

Разработка рациональных режимов нагрева непрерывнолитых заготовок в нагревательной печи стана 850 РУП «БМЗ». В связи с тем что в печи стана 850 нагрев металла может производиться с холодного либо горячего посадов, расчеты проведены по двум вариантам. На примере стали 80К был просчитан нагрев с холодного посада высокоуглеродистых марок стали (рис. 6).

Результаты анализа показали, что форсированный режим позволяет сократить расход топлива более чем на 1 кг у. т./т, увеличить производительность на 9% и сократить окалинообразование на 10% за счет уменьшения продолжительности пребывания металла в высокотемпературных зонах.

Аналогичные исследования были проведены для рядовых углеродистых сталей на примере стали Ст3, а также при разработке форсированных режимов нагрева легированных сталей при горячем посаде (на примере стали ШХ15).

При использовании форсированного режима для нагрева углеродистых марок сталей (рис. 7) можно добиться существенного снижения окалинообразования (на 1 кг/т), а также снизить расход топлива более чем на 0,7 кг у. т./т. При этом также существенно снижаются термоупругие напряжения в заготовках.

При нагреве высоколегированных и термочувствительных сталей нагрев в печи стана 850 осуществляют по режиму горячего посада заготовок (с температурой поверхности около 700–800 °С).

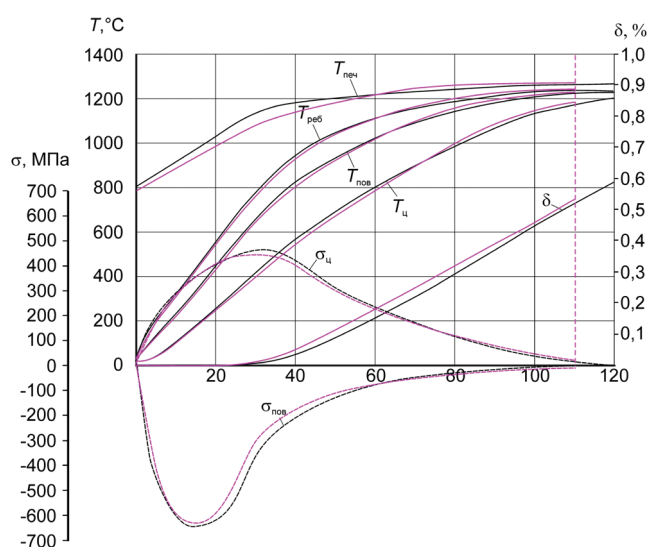


Рис. 6. Сравнение температур в характерных точках сечения заготовки размером 250×300 мм из стали 80К, количества окалины и величина возникающих термонапряжений при нагреве в печи стана 850 по заводскому и предлагаемому (форсированному) режимам: — — заводской режим; - - - - предлагаемый режим

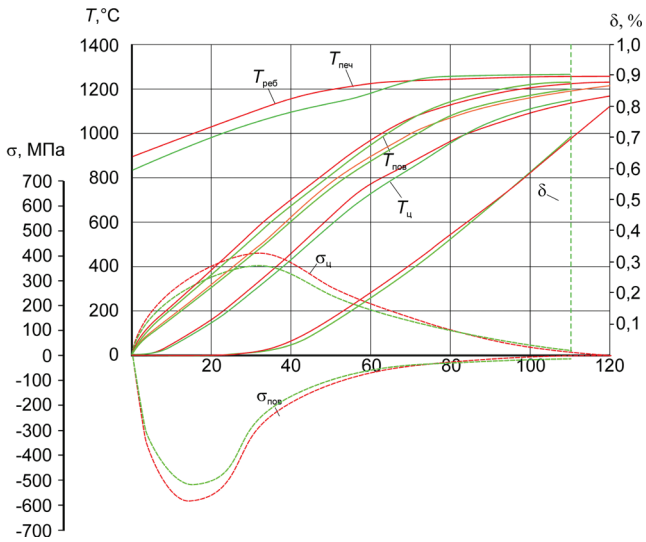


Рис. 7. Сравнение температур в характерных точках сечения заготовки размером 250×300 мм из стали Ст3, количества окислы и величина возникающих термонапряжений при нагреве в печи стана 850 по заводскому и предлагаемому (форсированному) режимам: ———— — заводской режим; ———— — предлагаемый режим

Форсированный режим нагрева термочувствительных марок сталей (на примере заготовок из стали ШХ15 сечением 250×300 мм) в сравнении с заводским показан на рис. 8.

Форсированный режим позволяет повысить производительность на 8 т/ч и понизить расход условного топлива на 1 кг у. т./т. К тому же, за счет уменьшения продолжительности пребывания металла в высокотемпературных зонах снизится окислыобразование (более чем на 10%).

Результаты выполненных исследований и разработанных рекомендаций по нагреву металла

в печи стана 850 использованы при внесении изменения в технологическую инструкцию ТИ 840-П2-01-2005 «Производство заготовок и сортового проката на стане 850» в условиях РУП «БМЗ».

Разработка рекомендаций по нагреву заготовок крупного сечения в кольцевой печи РУП «БМЗ». Полученные решения задачи противоточного радиационно-конвективного нагрева цилиндрических заготовок использованы при моделировании температурных полей и термонапряжений, возникающих в процессе нагрева трубных заготовок большого диаметра в кольцевой печи. Были проведены расчеты процессов нагрева литых заготовок диаметром 200 мм и более из следующих марок стали: 40Х, 45 и 40ХН. В качестве примера на рис. 9–11 приведены результаты расчетов динамики температур и напряжений в характерных точках заготовки диаметром 200 мм.

Полученные результаты по режимам нагрева цилиндрических заготовок крупного сечения предполагается использовать при освоении технологии нагрева литых заготовок большого сечения (200 мм и более) в кольцевой печи трубопрокатного комплекса РУП «БМЗ».

Выводы

Созданные инженерные методики расчета температурных полей и термических напряжений использованы для разработки практических рекомендаций по выбору рациональных режимов и конструктивных параметров высокотемпературных металлургических агрегатов в технологической цепочке «выплавка стали в дуговых сталеплавиль-

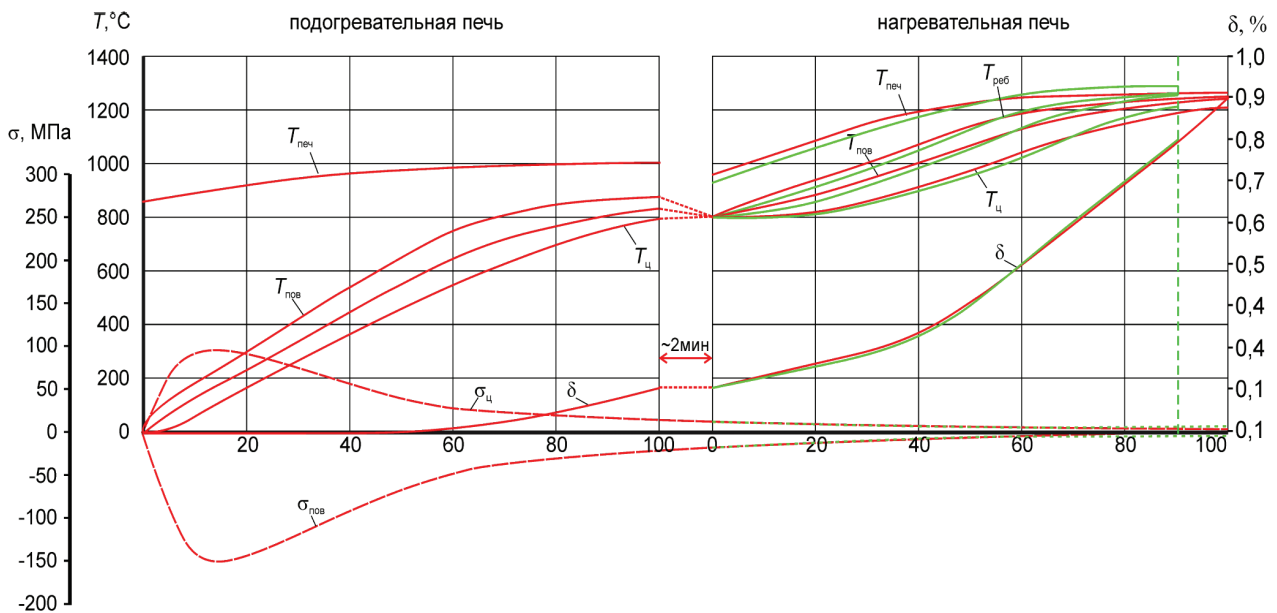


Рис. 8. Сравнение температур в характерных точках сечения заготовки размером 250×300 мм из стали ШХ15, количества окислы и величина возникающих термонапряжений при нагреве в подогревательной и нагревательной печах стана 850 по заводскому и предлагаемому (форсированному) режимам: ———— — заводской режим; ———— — предлагаемый режим

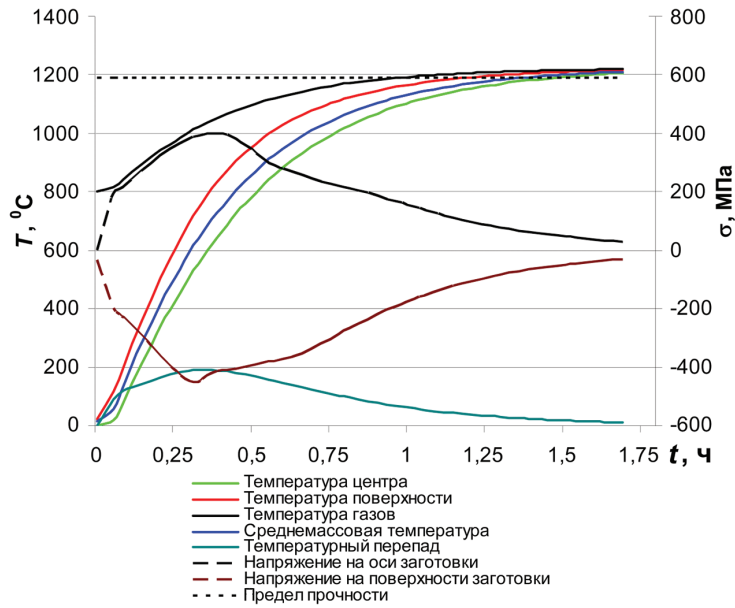


Рис. 9. Динамика температур и термонапряжений в характерных точках заготовки диаметром 200 мм из стали 40X

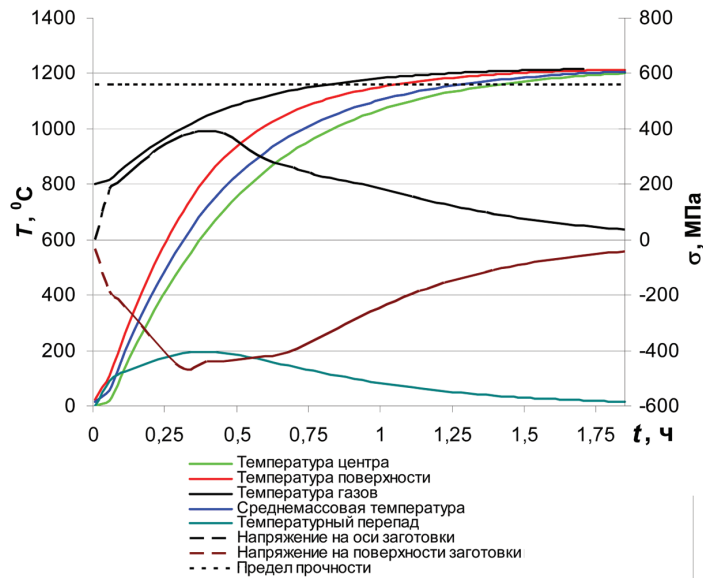


Рис. 10. Динамика температур и термонапряжений в характерных точках заготовки диаметром 200 мм из стали 45

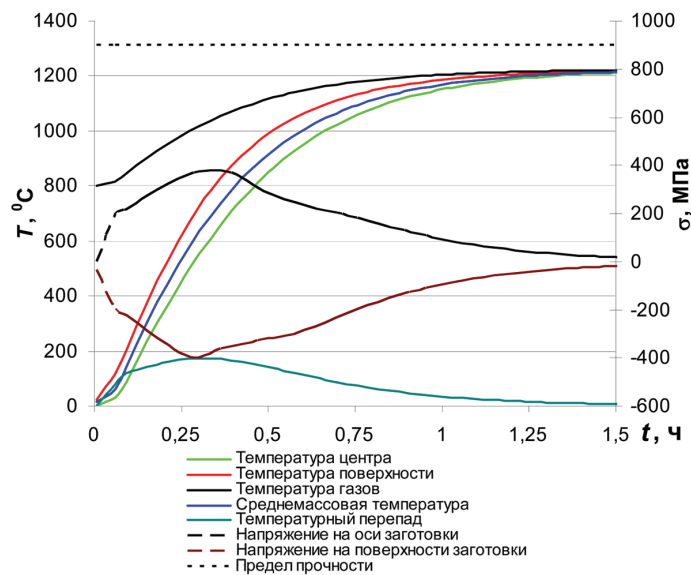


Рис. 11. Динамика температур и термонапряжений в характерных точках заготовки диаметром 200 мм из стали 40XH

ных печах – разливка заготовок на МНЛЗ – нагрев в нагревательных печах прокатных станом».

1. На основе расчетного анализа нагрева и плавления горячепрессованных брикетов выданы рекомендации по использованию их в дуговой сталеплавильной печи применительно к РУП «БМЗ». Результаты исследований использованы при разработке технологии выплавки стали и выборе последовательности загрузки брикетов.

2. Полученные результаты расчетного анализа процессов затвердевания металла в условиях машин непрерывного литья заготовок позволяют оценивать основные технологические параметры кристаллизатора и зоны вторичного охлаждения и могут найти применение при выборе различных конструкций МНЛЗ, в том числе на РУП «БМЗ».

3. При использовании инженерных методик теплового и термонапряженного состояния металла разработаны рекомендации по определению рациональных условий нагрева заготовок в промышленных печах с учетом требований термической

прочности металла с целью снижения брака за счет трещинообразования.

4. Предложены усовершенствованные режимы нагрева непрерывнолитых и катаных заготовок в нагревательных печах прокатных станом 320 и 150 РУП «БМЗ», позволившие снизить уровень термических напряжений, и, как следствие, уменьшить количество брака при нагреве, снизить топливопотребление и окисление.

5. Результаты выполненных исследований и разработанных рекомендаций по нагреву металла в печи стана 850 использованы при внесении изменения в технологическую инструкцию ТИ 840-П2-01-2005 «Производство заготовок и сортового проката на стане 850» в условиях РУП «БМЗ».

6. Полученные результаты по определению рациональных режимов нагрева цилиндрических заготовок крупного сечения могут быть использованы при освоении технологии нагрева литых заготовок (диаметром 200 мм и более) в кольцевой печи трубного комплекса РУП «БМЗ».

Литература

1. Тимошпольский В. И. Теплотехнологические основы металлургических процессов и агрегатов высшего технического уровня. Мн.: Навука і тэхніка, 1995.
2. Стальной слиток. В 3-х т. Т. 2. Затвердевание и охлаждение / Ю. А. Самойлович, В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова, В. В. Филиппов; Под общ. ред. В. И. Тимошпольского, Ю. А. Самойловича. Мн.: Белорусская наука, 2000.
3. Стальной слиток. В 3-х т. Т. 3. Нагрев / В. И. Тимошпольский, Ю. А. Самойлович, И. А. Трусова, В. В. Филиппов, А. П. Несенчук; Под общ. ред. В. И. Тимошпольского, Ю. А. Самойловича. Мн.: Белорусская наука, 2001.
4. Тимошпольский В. И. Роль отечественной научной школы в освоении и организации производства на РУП «БМЗ» // Сталь. 2002. № 10. С. 8–12.
5. Тимошпольский В. И., Анисович Г. А., Трусова И. А., Маточкин В. А. Ученые – металлургической промышленности // Наука – народному хозяйству. Мн.: Аналитический центр НАН Беларуси, 2002. С. 571–582.
6. Рубинштейн Л. И. Проблема Стефана. Рига: Звайгзне, 1967.
7. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964.
8. Stefan G. T. Über einige Problem der Theori der Warme Leitung Sitzungsberichte der Kais // Math. Natur Wissen schaftliche Clas. Wien: Academicder Wissenschaften, 1889. Vol. 98. N 3.
9. L a m e H., C l a r e y r o n V. // Aun. de chemie et de physique. 1831. Vol. 47. P. 250.
10. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высш. шк., 1967.
11. Иванцов Г. П. Нагрев металла. Свердловск – М.: Металлургиздат, 1948.
12. Лыков А. В. Методы решения нелинейных уравнений нестационарной теплопроводности // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1970. № 5. С. 109–150.
13. Самойлович Ю. А. Формирование слитка. М.: Металлургия, 1977.
14. Иванцов Г. П. Приближенный расчет кристаллизации слитка // Теплотехника слитка и печей: Тр. ЦНИИЧМ. М.: Металлургиздат, 1953.
15. Семикин И. Д., Гольдфарб Э. М. Динамика затвердевания отливок // Литейное производство. 1956. № 2.
16. Гольдфарб Э. М. Теплотехника металлургических процессов. М.: Металлургия, 1967.
17. Вейник А. И. Теория затвердевания отливки. М.: Машиздат, 1953.
18. Постольник Ю. С. Приближенные методы исследований в термомеханике. Киев – Донецк: Виш. шк., 1984.
19. Семикин И. Д., Розенгарт Ю. И., Гольдфарб Э. М. Нагрев массивных тел излучением // Сталь. 1956. № 3.
20. Бровкин Л. А. Обобщенные номограммы для расчета нагрева излучением неограниченной пластины и бесконечно длинного цилиндра // Изв. вузов. Энергетика. 1965. № 3.
21. Соколов В. Н. Расчеты нагрева металла в металлургических печах. М.: Металлургиздат, 1956.
22. Гольдфарб Э. М. Динамика плавления шихты в плавильных печах // Изв. вузов. Черная металлургия. 1960. № 11.
23. Свинолобов Н. П., Семикин И. Д. Динамика процесса плавления // Изв. вузов. Черная металлургия. 1963. № 1.
24. Тимошпольский В. И., Постольник Ю. С., Трусова И. А., Дубина О. В. Тепловые процессы при затвердевании крупных стальных слитков // Литье и металлургия. 2000. № 1.
25. Тимошпольский В. И., Постольник Ю. С., Трусова И. А., Козлов С. М., Дубина О. В. Графоаналитический метод расчета процесса затвердевания стальных слитков // ИФЖ. 2001. Т. 74. № 3.

26. Тимошпольский В. И., Дубина О. В., Цкитишвили Э. О., Кияшко Н. А. Усовершенствование тепловой работы методических печей для нагрева блюмовых заготовок // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2001. № 1.
27. Тимошпольский В. И., Постольник Ю. С., Андрианов Д. Н. Теоретические основы теплофизики и термомеханики в металлургии. Мн.: Белорусская наука, 2005.
28. Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Пекарский М. Я. Кольцевые печи: Теория и расчеты. Мн.: Выш. шк., 1993.
29. Промышленные теплотехнологии: Машиностроительное и металлургическое производство: Учеб. в 5-ти ч. Ч. 1 / А. П. Несенчук, В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова, Н. Л. Мандель. Мн.: Выш. шк., 1995.
30. Промышленные теплотехнологии: Моделирование нелинейных процессов: Учеб. в 5-ти ч. Ч. 5 / В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова, А. П. Несенчук, С. С. Бродский, О. В. Дубина, И. А. Павлюченков. Мн.: Выш. шк., 2000.
31. Металлургические печи. Теория и расчеты: Учеб. В 2-х т. / В. И. Губинский, В. И. Тимошпольский, В. М. Ольшанский и др. Мн.: Белорусская наука, 2007.