

УДК 621.78+669.046

РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ СОВМЕЩЕННЫХ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЯХ

Доктора техн. наук, профессора ТИМОШПОЛЬСКИЙ В. И., САМОЙЛОВИЧ Ю. А.,
кандидаты техн. наук ФИЛИППОВ В. В., ТРУСОВА И. А., КОЗЛОВ С. М.,
инж. МАТОЧКИН В. А.

*Белорусская государственная политехническая академия,
Республиканское унитарное предприятие «Белорусский металлургический завод»*

В настоящее время с учетом сложившейся экономической ситуации и существующих рыночных условий одним из важнейших направлений создания высокоэффективных технологий в металлургическом производстве являются разработка и совершенствование действующих теплотехнологических режимов, обеспечивающих улучшение качества металлопродукции наряду с рациональным использованием топлива. Наиболее действенный путь создания энергосберегающих технологий в условиях металлургических предприятий – организация так называемого горячего посада слитков и заготовок в нагревательные устройства. Такая промышленная теплотехнология получила название совмещенного теплотехнологического процесса «затвердевание–охлаждение–нагрев» (СТТП) [например, 1, 2].

В продолжение исследований, посвященных изучению закономерностей СТТП при горячем посаде крупных промышленных слитков, в том числе с незатвердевшей сердцевиной, в нагревательные колодцы, разработанная методология комплексного изучения организации горячего посада непрерывнолитых заготовок. Исследования выполнены применительно к металлургическим агрегатам и процессам высшего технического уровня, функционирующим в условиях Белорусского металлургического завода (МНЛЗ № 3 – печь с шагающими балками стана 850).

В основу комплексной методологии положены математическое моделирование процессов затвердевания, охлаждения и нагрева непрерывнолитых заготовок; проведение серии промышленных экспериментов; детальное исследование процессов с учетом множества факторов [3].

Математическая модель совмещенного теплотехнологического процесса учитывает основные теплофизические параметры процессов (химический состав стали, зависимость теплофизических свойств от температуры, сложный теплообмен на поверхности заготовок), технологические особенности прохождения заготовок от момента разлива до выдачи в прокатный стан (расход воды на охлаждение на МНЛЗ, продолжительность пребывания на воздухе и в термостате, расположение заготовок с зазорами при на-

греве в печи с шагающими балками, конструктивные особенности печей) и включает расчеты упругопластических деформаций и напряжений в твердой оболочке непрерывнолитой заготовки.

В соответствии с изложенным выше запишем математическую модель совмещенного теплотехнологического процесса.

Температурное поле непрерывнолитой заготовки в течение всего совмещенного процесса описывается единым дифференциальным уравнением нестационарной теплопроводности

$$\rho(T)c_{эф}(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial y}\right), \quad (1)$$

где

$$\rho = \begin{cases} \rho_{тв}(T) & \text{при } T \leq T_{сол}; \\ \frac{\rho_{тв} + \rho_{ж}}{2} & \text{при } T_{сол} < T < T_{лик}; \\ \rho_{ж} & \text{при } T \geq T_{лик}; \end{cases}$$

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_{тв}(T) & \text{при } T \leq T_{сол}; \\ \frac{\lambda_{тв} + \lambda_{ж}}{2} & \text{при } T_{сол} < T < T_{лик}; \\ \lambda_{ж} & \text{при } T \geq T_{лик}; \end{cases}$$

$$c_{эф} = \begin{cases} c_{тв}(T) & \text{при } T \leq T_{сол}; \\ c_{тв} - L\frac{d\psi}{dT} & \text{при } T_{сол} < T < T_{лик}; \\ c_{ж} & \text{при } T \geq T_{лик}. \end{cases}$$

Условия симметрии

$$\left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=0} = \left.\frac{\partial T}{\partial y}\right|_{y=0} = 0. \quad (2)$$

Начальные условия:

$$T(x, y)_{\tau=\tau_{01}} = f_1(x, y); \quad T(x, y)_{\tau=\tau_{02}} = f_2(x, y). \quad (3)$$

Граничные условия запишутся следующим образом:

$$-\lambda\left(\frac{\partial T}{\partial x(y)}\right)_n = \begin{cases} \sigma(T_n^4 - T_{сп}^4) + \alpha(T_n - T_{сп}) - \text{при затвердевании} \\ \quad \text{и охлаждении на МНЛЗ;} \\ \sigma_b(T_n^4 - T_b^4) + \alpha_b(T_n - T_b) - \text{при транспортировке} \\ \quad \text{к термостату и к печи;} \\ \sigma_\tau(T_n^4 - T_\tau^4) + \alpha_\tau(T_n - T_\tau) - \text{при нахождении в термостате;} \\ \sigma_{печ}(T_{печ}^4 - T_n^4) + \alpha_{печ}(T_{печ} - T_n) - \text{при нагреве в печи.} \end{cases} \quad (4)$$

В (1)–(4) приняты обозначения:

T – текущая температура, К;

ρ , λ , c – плотность, теплопроводность и теплоемкость металла соответственно;

x , y – координаты;

ψ – доля твердой фазы;

$T_{\text{сол}}$, $T_{\text{лик}}$ – температуры солидуса и ликвидуса стали соответственно, К;

σ , α – коэффициенты теплообмена излучением и конвекцией соответственно;

$T_{\text{п}}$, $T_{\text{ср}}$, $T_{\text{в}}$, $T_{\text{т}}$, $T_{\text{печ}}$ – температуры поверхности заготовки, окружающей среды при затвердевании и охлаждении заготовки на МНЛЗ, воздуха при транспортировке к термостату, среды термостата, нагревательной печи соответственно.

Аналогичным образом обозначены индексы при коэффициентах внешнего теплообмена σ , α ;

τ_{01} , τ_{02} – моменты времени посадки заготовки в термостат и нагревательную печь соответственно.

Для расчетной оценки возникающих в корке непрерывнолитых заготовок термических напряжений использовали гипотезу В. А. Пальмова о стабилизированном распределении температуры в растущей корочке, а также эффект релаксации напряжений [4]. С учетом этого запишем

$$\sigma = \frac{\beta E (T_s - T_c)}{2(1-\nu)} \left(\frac{(1-X)(\varphi + 2X)}{(1+\varphi)(\varphi + X)} \right) - \ln \frac{\varphi + 1}{\varphi + X}, \quad (5)$$

где β , E , ν – коэффициент линейного расширения, модуль упругости, коэффициент Пуассона соответственно;

$X = x/\xi$ – относительная координата твердой фазы;

$T_{\text{сол}}$, $T_{\text{с}}$ – температуры солидуса и окружающей среды (стенки кристаллизатора, охлаждающей воды и воздуха) соответственно;

$\varphi = \lambda/\alpha(\xi + X_0)$; $X_0 = \lambda/\alpha$ – фиктивный слой твердой фазы.

С учетом проявления в области высоких температур эффекта релаксации для уточнения значений температурных напряжений использовалась следующая зависимость:

$$\sigma^* = \sigma \exp\left(\frac{\tau}{\tau_{\text{рел}}}\right), \quad (6)$$

где τ – текущее время;

$\tau_{\text{рел}}$ – время релаксации,

$$\tau_{\text{рел}} = \frac{\mu^*}{G} \exp\left[\frac{Q}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T^*}\right)\right]. \quad (7)$$

Здесь μ^* – коэффициент вязкости материала при температурах, близких к температуре солидуса ($\mu^* = 3,5 \cdot 10^9$ Па·с);

$G = G_0 \exp[-k(T - T_0)/(T^* - T_0)]$ – модуль сдвига;

G_0 – значение модуля сдвига при контрольной температуре $T_0 < T^*$ ($G_0 = 5 \cdot 10^8$ Па, $T_0 = 700$ °С, $T^* = 1400$ °С, $k = 4$);

$Q = 269,93$ кДж/моль – энергия активации;

$R = 8,31$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная.

Таким образом, с использованием предложенной методики представляется возможным определять температурное поле заготовки с учетом расхода охлаждаемой воды и скорости вытягивания, а также прогнозировать величину максимальных сжимающих термических напряжений по сечению заготовки в ходе затвердевания, охлаждения и последующего нагрева в печи стана 850.

Сформулированная математическая модель совмещенного процесса (1)–(7) решена методом конечных разностей по неявной схеме.

Параметрическая настройка математической модели осуществлена на основании данных экспериментальных исследований затвердевания непрерывнолитой заготовки сечением $0,250 \times 0,300$ м и последующего нагрева с горячего и холодного посадок в нагревательной печи стана 850 БМЗ. Методика проведения промышленных экспериментов по термометрированию непрерывнолитых заготовок в процессе затвердевания и охлаждения на МНЛЗ детально описана в [1, 3, 5], при нагреве в печах с механизированным подом – в [1–3]. Результаты изменения температуры в характерных точках заготовки сечением $0,250 \times 0,300$ м приведены на рис. 1, условия проведения эксперимента – в табл. 1. На рис. 1 также показаны расчетные

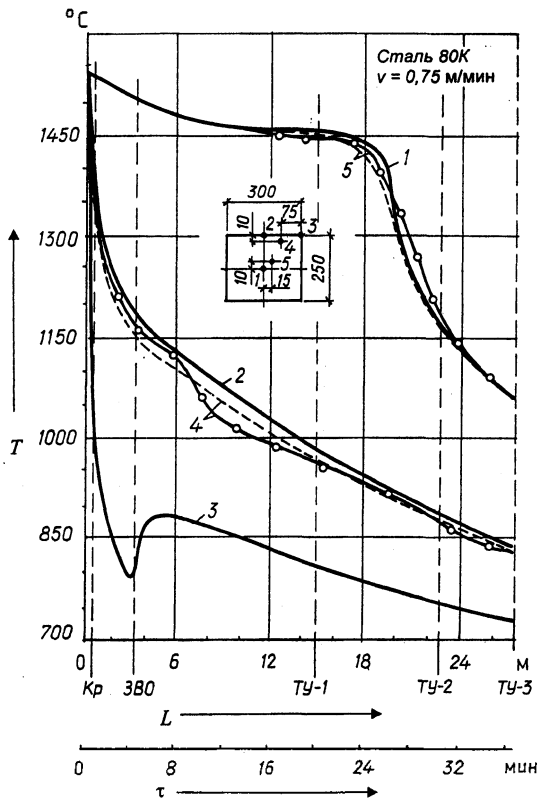


Рис. 1. Изменение температуры в непрерывнолитой заготовке сечением $0,250 \times 0,300$ м: о—о—о – по опытным, —, - - - – по расчетным данным в различных точках сечения

данные изменения температуры в точках 1 и 2 исследуемой заготовки, полученные при решении задачи затвердевания и охлаждения. Здесь очевидно вполне удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных данных.

Таблица 1

Условия проведения экспериментов при затвердевании и охлаждении непрерывнолитых заготовок

Марка стали	Размеры заготовок, м	Температура разливки, °С	Скорость разливки, м/мин	Расход воды на первичное охлаждение, л/мин	Расход воды на вторичное охлаждение, л/мин
80К	0,250 × 0,300	1522	0,75	1692	91

При параметрической настройке задачи нагрева заготовок в печи стана 850 использованы экспериментальные данные, полученные в результате измерения температуры поверхности заготовки сечением 0,250 × 0,300 м (сталь 80К) оптическим пирометром. Результаты сопоставления расчетных и экспериментальных данных при организации режимов горячего посада заготовок приведены на рис. 2, из которого также очевидно удовлетворительное согласование термограмм.

Для уточнения параметров внешнего и внутреннего теплообмена при нагреве непрерывнолитых заготовок в печи стана 850 дополнительно была проведена параметрическая идентификация по результатам нагрева кордовых сталей с холодного посада [6], что в совокупности существенно повысило надежность проведения вычислительных экспериментов с целью дальнейшей разработки ресурсосберегающих теплотехнологических процессов.

На последующем этапе исследований разработанная математическая модель совмещенного процесса затвердевания, охлаждения и нагрева непрерывнолитых заготовок, реализованная в виде пакета программных продуктов, использована для анализа технологии и разработки режимов горячего посада высокоуглеродистой стали (кордовой, бортовой) с целью интенсификации процессов на линии МНЛЗ-3 – стан 850 Белорусского металлургического завода.

При проведении серии численных экспериментов по выявлению закономерностей совмещенного процесса варьировали следующие технологические параметры: скорость разливки на МНЛЗ, время транспортировки

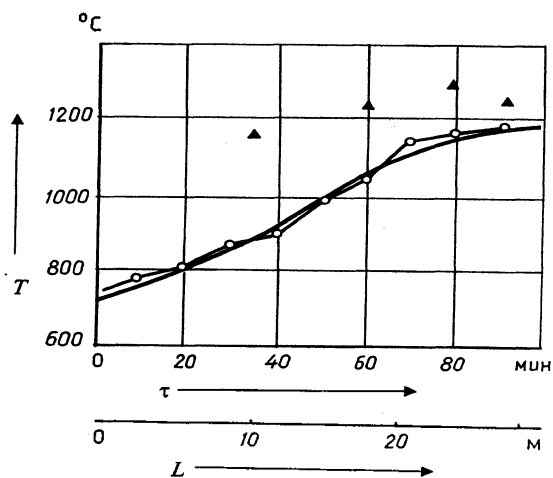


Рис. 2. Изменение температуры поверхности непрерывнолитой заготовки сечением 0,250 × 0,300 м при нагреве с горячего посада в печи стана 850: о—о—о—эксперимент; — — — расчет; ▲ — показания штатных термопар

непрерывнолитой заготовки к термостату; время пребывания заготовки в термостате; продолжительность нагрева металла в нагревательной печи стана 850; температурный режим печи по зонам.

Анализ результатов расчетов показал, что с точки зрения интенсификации процесса на линии МНЛЗ-3 – стан 850 и организации ресурсосберегающих теплотехнологий при производстве кордовых марок сталей наиболее оптимальной является скорость разливки 0,7...0,8 м/мин. При скорости разливки 0,6 м/мин максимальная (проектная) производительность печи при регламентированном температурном режиме (в соответствии с действующей технологической инструкцией) не обеспечивается.

Установлены оптимальные временные и технологические параметры совмещенного процесса, обеспечивающие максимальную (проектную) производительность печи стана 850 при нагреве заготовок сечением 0,250 × 0,300 м (107 т/ч).

Скорость разливки, м/мин	Время транспортировки к термостату, мин	Время пребывания в термостате, мин	Время нагрева в печи, мин	Удельный расход условного топлива при нагреве, кг у.т. /т
0,7	≤10	0	80...90	21...23
0,75	≤20	0	80...90	19...21
0,8	≤30	0	80...90	17...19

Анализ технико-экономических показателей тепловой работы печи при реализации разработанных режимов горячего посада показывает, что удельный расход условного топлива при этом сократился на 1...5 кг у. т. /т (в зависимости от производительности печи) по сравнению с действующими режимами (22...24 кг у. т. /т).

Следует также отметить, что пребывание заготовок в термостате не оказывает существенного влияния на продолжительность последующего нагрева заготовок, поэтому данная операция может быть исключена.

На последующем этапе исследовали возможность увеличения проектной производительности печи за счет сокращения времени нагрева непрерывнолитых заготовок в печи до 60...70 мин (при скорости разливки 0,8 м/мин). С этой целью сократили время транспортировки заготовки к печи до 10 мин и осуществляли горячий посад непосредственно в нагревательную печь (минуя термостат). Для обеспечения возможности уменьшения продолжительности нагрева до 60 мин предложили режим форсированного нагрева (рис. 3). При этом, несмотря на изменение температурного графика печи (увеличение температур в зонах в среднем на 20...30 °С по сравнению с режимом нагрева в соответствии с действующей технологической инструкцией), достигнуто сокращение удельного расхода условного топлива за счет увеличения производительности печи. Анализ основных показателей тепловой работы печи по предлагаемому режиму показывает, что удельный расход условного топлива находится на уровне 15...17 кг у. т. /т, коэффициент полезного действия 63...65 %, что превосходит лучший мировой уровень аналогичных печных установок с механизированным подом.

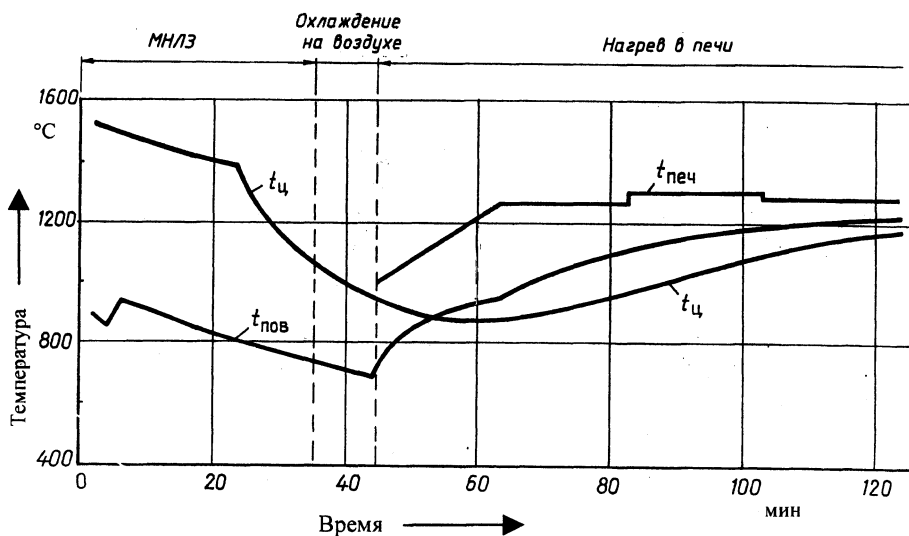


Рис. 3. Изменение температуры поверхности $t_{пов}$ и центра $t_{ц}$ заготовки сечением $0,250 \times 0,300$ м в совмещенном процессе «затвердевание–охлаждение–нагрев»: скорость разливки – $0,8$ м/мин, время транспортировки к термостату – 10 мин, время пребывания в термостате – 0 мин, время нагрева в печи – $60...70$ мин при измененном температурном графике

ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель совмещенного процесса «затвердевание – охлаждение на МНЛЗ-3 – транспортировка – выдержка в термостате – нагрев в печи стана 850 непрерывнолитой заготовки» и осуществлена ее численная реализация.

2. Выполнена параметрическая настройка математической модели, которая показала удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных термограмм при затвердевании, охлаждении и последующем нагреве непрерывнолитых заготовок.

3. Проведены серии численных экспериментов, при этом установлены закономерности организации режимов горячего посада для интенсификации теплотехнологических процессов на линии МНЛЗ-3 – стан 850 при производстве кордовых марок сталей, и выявлены резервы для снижения удельного расхода условного топлива и повышения на $2-5\%$ проектной производительности печных установок, функционирующих в условиях Белорусского металлургического завода. При этом для печных агрегатов с шагающими балками, работающих в условиях косвенного радиационно-конвективного нагрева за счет сводового отопления, достигнуты рекордные технико-экономические показатели в мировой практике эксплуатации подобных агрегатов: удельный расход условного топлива находится на уровне $15...17$ кг у. т./т, коэффициент полезного действия – $63...65\%$, что превосходит лучший мировой уровень аналогичных печных установок с механизированным подом, функционирующих на металлургических предприятиях Японии, Германии, Италии и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. Filippov V. V., Timoshpolsky V. I., Trusova I. A. Belorussian Metallurgical Plant (BMZ) a modern Enterprise for Production and Research. FAI. Austria, 2001. – 213 p.
2. Стальной слиток: В 3 т. – Т. 3: Нагрев / В. И. Тимошпольский, Ю. А. Самойлович, И. А. Трусова и др.; Под общ. ред. В. И. Тимошпольского, Ю. А. Самойловича. – Мн.: Белорусская наука, 2001. – 879 с.

3. Тимошпольский В. И. Теплотехнологические основы металлургических процессов и агрегатов высшего технического уровня. – Мн.: Наука і тэхніка, 1995. – 256 с.

4. Расчетно-теоретическое исследование температурных полей и термонапряжений заготовок в ходе непрерывного литья / В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова, С. М. Козлов и др. // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2001. – № 4. – С. 54–60.

5. Стальной слиток: В 3 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. – 636 с.

6. Теплотехнология нагрева высокоуглеродистых марок сталей в печах с механизированным подом РУП «Белорусский металлургический завод» / В. И. Тимошпольский, В. В. Филиппов, И. А. Трусова и др. // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2001. – № 5. – С. 71–81.

Представлена

НТС УНПО «БГПА–БМЗ»

Поступила 17.01.2002

УДК 536.244

ТЕПЛОИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЯХ

Докт. техн. наук, проф. **НЕСЕНЧУК А. П.**

Белорусская государственная политехническая академия

Человек привык рассматривать природную среду как неисчерпаемый источник сырья, энергии, пищи и как сток бесконечной емкости для отходов жизнедеятельности. Несмотря на имевшие место в истории человечества экологические кризисы, преодоление которых приводило к новому, более совершенному типу хозяйства, вопросы взаимодействия человека со средой обитания привлекли пристальное внимание лишь в последние десятилетия.

Уже сейчас стала серьезной проблема дефицита органического топлива, породившая проблему мирового значения, связанную со сбросом в атмосферу диоксида углерода и сохранением климата Земли. Быстрый рост добычи топлива в последние годы, обусловленный научно-технической революцией, привел к исчерпанию дешевых и доступных источников.

Две трети добываемого топлива расходуется в промышленности. К примеру, только в Российской Федерации в 2000 г. добыто 323,1 млн т нефти (рис. 1), не считая твердого и газообразного топлива. Такое количество нефти (без учета технологической ее части, не участвующей в сжигании) при использовании в качестве топлива в промышленности и энергетике только в 2000 г. обеспечило сброс в мировой воздушный бассейн до 180 млн м³ диоксида углерода. Если же учесть топливную составляющую добычи угля и газа, то вклад Российской Федерации в такой сброс в 2000 г.