

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ СЛИТКОВ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ В ТЕРМОСТАТАХ

Ю.И.Усенко, В.И. Иванов, В.Ф. Сапов (НМЕТАУ, г. Днепропетровск), Н.В. Коваль (ЗГИА, г. Запорожье), П.И. Тищенко, С.Н. Тимошенко (ДонНТУ, г. Донецк)

Представлены результаты экспериментально-расчетного изучения распределения температуры в слитках специальных сталей, подвергаемых охлаждению в неотопливаемых термостатах после плавки в печах электрошлакового переплава и отжига в рециркуляционных печах с выдвижным подом. Предложены рациональные режимы охлаждения слитков, позволяющие повысить пропускную способность данных агрегатов при неизменном качестве металла.

В условиях ОАО «Электрометаллургический завод «Днепрспецсталь»» слитки специальных марок стали сечением (1000-1400)х(400-600) мм и длиной 1700-2000 мм после выхода из кристаллизаторов печей электрошлакового переплава и на завершающей стадии отжига после выгрузки из рабочего пространства рециркуляционных пламенных печей с выдвижным подом подвергают охлаждению в неотопливаемых термостатах до температуры поверхности металла 200 ± 100 °С.

Данные термостаты состоят из четырех изолированных друг от друга ячеек прямоугольного сечения, футерованных изнутри шамотным кирпичом и закрываемых крышками сварной конструкции. Для предотвращения разрушения внутренней поверхности стенок термостатов при загрузке и выгрузке слитков по их периметру размещены литые чугунные плиты. На массивный под термостатов загружают и размещают в один ряд 8-9 слитков.

Опыт эксплуатации агрегатов данного типа свидетельствует о низкой интенсивности отвода теплоты от поверхностных слоев металла к охлаждающей среде (воздуху) в интервале температур 550...2000С, что приводит к значительному возрастанию длительности пребывания слитков в их рабочем пространстве, а, следовательно, и снижению их пропускной способности.

В этой связи проводили комплекс экспериментальных и расчетных исследований распределения температуры в слитках, охлаждаемых в термостатах, направленных на выявление оптимальных условий пребывания металла в температурных интервалах, ответственных за формирование его

структуры и напряженного состояния, а также возможности обоснованного сокращения длительности заключительной стадии данной операции.

На первом этапе работы исследовали¹ поля температуры в контрольных слитках, охлаждаемых, как в периферийных, так и центральных зонах рабочего пространства термостата при различной степени его заполнения слитками и определяли величину температурных перепадов по их сечению с последующей оценкой уровня термоупругих напряжений в металле. Изучали фактическую скорость охлаждения различных участков поверхностных и срединных слоев металла ($V_{охл}$), а также характер распределения температуры по сечению слитков на протяжении всего исследуемого процесса.

На рис.1 представлена схема расположения контрольных слитков в рабочем пространстве термостатов. Горячие спаи датчиков гибкого экранированного термокабеля типа КТМС-ХА размещали в четырех точках (на оси и в центре поверхности верхней и боковых граней) в каждом из трех поперечных (левое торцевое, срединное и правое торцевое) сечений слитков для получения объективной информации о распределении температуры в металле при его охлаждении.

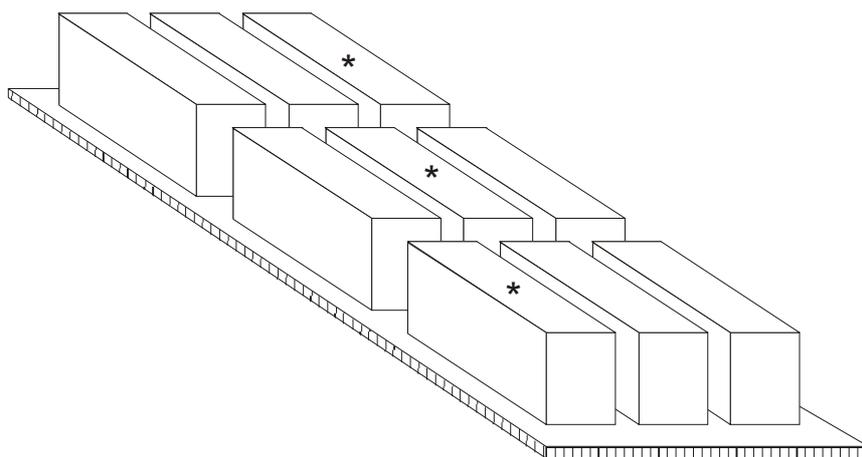


Рисунок 1 – Схема размещения слитков в рабочем пространстве термостатов (* - место расположения контрольных слитков).

С целью имитации процесса охлаждения металла после выплавки в печах электрошлакового переплава контрольные слитки предварительно подвергали нагреву в рабочем пространстве рециркуляционной пламенной печи с выдвижным подом до температуры 900°C и последующей изотермической выдержке для достижения центральными слоями металла уровня температуры $850...860^{\circ}\text{C}$. Кроме того, охлаждению в термостатах подвер-

¹ В экспериментах принимали участие Г.М.Френкель, П.В.Сергеев, Ю.В.Михеев, М.Л.Шавердова и Д.И.Резникова

гали контрольные слитки и на завершающем этапе их отжига - в интервале температур ниже 550 °С.

На начальной стадии охлаждения слитков после их выплавки в печах электрошлакового переплава (при транспортировке и загрузке в термостаты) снижение температуры в отдельных точках поверхности металла достигало 80...95 °С. Такой интенсивный отвод теплоты от поверхностных слоев металла сопровождается появлением значительной разности температуры (ΔT) по сечению слитков и в случае, когда максимальная величина сжимающих термоупругих напряжений на оси слитков превышает предел прочности металла на сжатие $\sigma_{\text{в}}(T)$, может вызвать нарушение сплошности поверхностных слоев данного металла.

Уровень сжимающих термоупругих напряжений на оси слитков оценивали с использованием известной зависимости [1]

$$\sigma = \frac{\beta \cdot E}{1 - \nu} \cdot \Delta T, \quad (1)$$

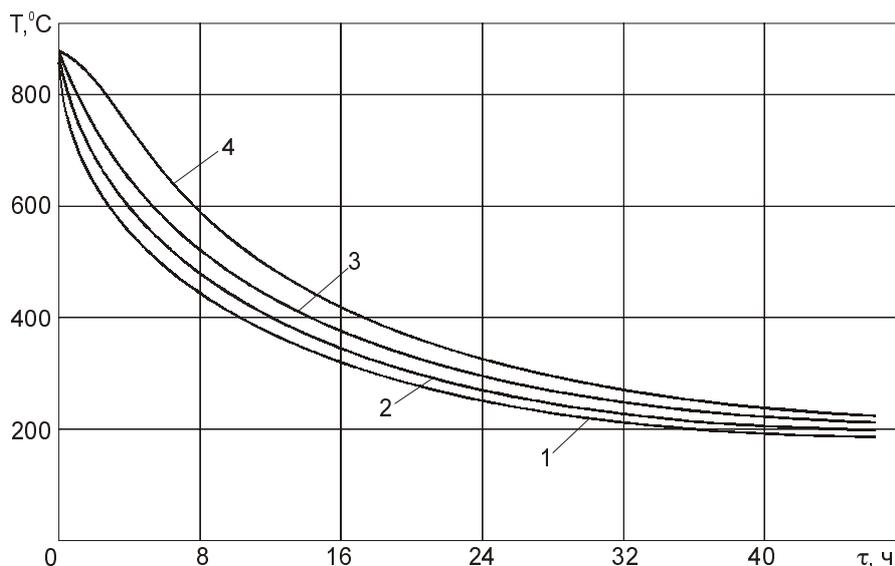
где $\beta = \beta(T)$, $E = E(T)$ - коэффициент линейного расширения, 1/К, и модуль упругости, Н/мм², стали соответственно; ν - коэффициент Пуассона, для стали $\nu = 0,3$.

Как установлено проведенными расчетами, при длительности транспортировки слитков $\tau_{\text{тр}} \geq 0,19$ ч значения сжимающих термоупругих напряжений существенно приближаются к предельно допустимому уровню, что вынуждает ограничиться величиной $\tau_{\text{тр}} = 0,17$ ч.

В ходе последующих экспериментов изучали особенности процесса охлаждения слитков в термостатах и выявили три характерные стадии, которые отличаются скоростями изменения температуры поверхности металла (см. рис. 2 и 3):

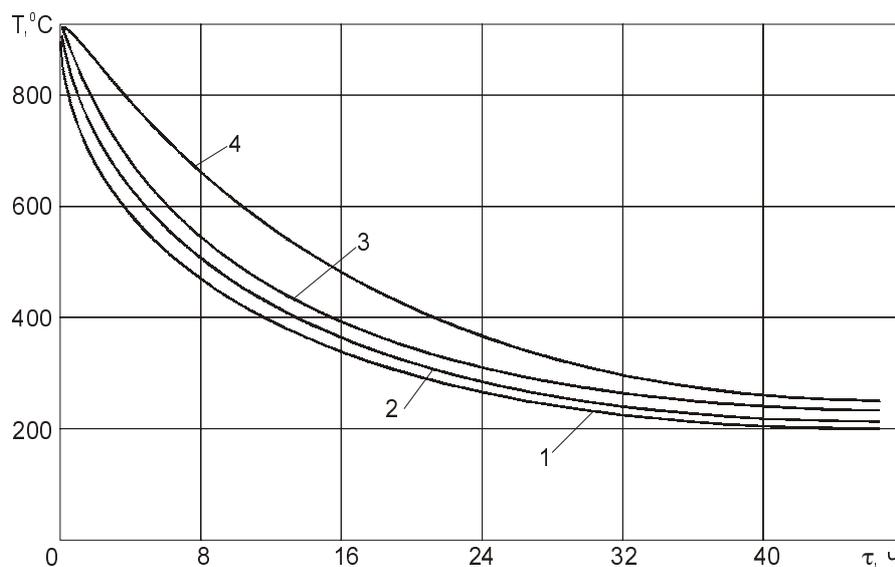
- стадия максимальной интенсивности охлаждения (при температуре поверхности металла 850...600 °С);
- стадия умеренного темпа охлаждения (при температуре поверхности металла 600...400 °С);
- стадия регулярного режима с мало изменяющимися значениями коэффициента теплоотдачи (при температуре поверхности металла 400...200 °С).

На стадии максимальной интенсивности охлаждения слитков в термостате вследствие тепловой инерции исследуемого процесса ускоренное понижение температуры поверхностных слоев металла не сопровождается высокими скоростями понижения температуры его срединных участков. Так, через 3,9 ч после загрузки контрольных слитков в термостат температура их наружной поверхности снизилась до 600...610 °С, в то время как температура срединных слоев составляла 810...815 °С.



1, 2, 3 - температура поверхностных слоев металла; 4 - температура срединных слоев металла

Рисунок 2 - Кривые понижения температуры различных слоев контрольного слитка, располагаемого в периферийной зоне рабочего пространства термостата.



1, 2, 3 - температура поверхностных слоев металла; 4 - температура срединных слоев металла

Рисунок 3 - Кривые понижения температуры различных слоев контрольного слитка, располагаемого в центральной зоне рабочего пространства термостата.

При этом было зафиксировано достаточно равномерное понижение температуры поверхностных слоев металла (разность температуры между

различными точками на его поверхности не превышала 35...40 °С). Следует отметить, что максимум температурного перепада по сечению слитков наблюдается через 3...4 ч после загрузки в термостат (200...210 °С), но к концу стадии умеренного темпа охлаждения его величина значительно уменьшается (до 75...80 °С) и на заключительном этапе (при охлаждении со скоростью ниже 10 град/ч) - не превышает 10...15 °С.

Как свидетельствуют результаты проведенных экспериментов, расположение слитков в рабочем пространстве термостатов оказывает существенное влияние на процесс охлаждения металла: зафиксировано незначительное замедление понижения температуры поверхностных слоев металла для слитков, расположенных в центральной части рабочего пространства термостата.

Второй этап работы предусматривал теоретическое исследование нестационарных полей температуры в поперечном сечении охлаждаемых слитков прямоугольной формы, располагаемых в различных зонах рабочего пространства термостата.

Математическую модель исследуемого процесса разрабатывали при следующих допущениях:

распределение температуры неподвижной среды (воздуха) в рабочем пространстве термостата равномерное и является функцией времени;

- поверхность нижней грани слитков находится в идеальном тепловом контакте с поверхностью пода термостата;
- теплообмен остальных граней слитков с окружающей средой осуществляется естественной конвекцией, а с поверхностью кладки боковых стен термостата - излучением;
- теплофизические свойства металла зависят от температуры.

В этом случае тепловая задача процесса охлаждения слитков описывается двумерным нелинейным дифференциальным уравнением теплопроводности:

$$c \cdot \rho \frac{\partial U(x, y, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial U(x, y, \tau)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda \frac{\partial U(x, y, \tau)}{\partial y} \right] \quad (2)$$

с краевыми условиями

$$-\lambda \frac{\partial U(x, y, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_{к1} \cdot [U_1(x, y, \tau) - T_c] + \alpha_{изл1} \cdot [U_1(x, y, \tau) - T_{кл}] \quad (3)$$

$$-\lambda \frac{\partial U(x, y, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=B} = \alpha_{к,2} \cdot [U_2(x, y, \tau) - T_c] + \alpha_{изл,2} \cdot [U_2(x, y, \tau) - T_{кл}] \quad (4)$$

$$-\lambda \frac{\partial U(x, y, \tau)}{\partial y} \Big|_{y=D} = \alpha_{к,3} \cdot [U_3(x, y, \tau) - T_c] + \alpha_{изл,3} \cdot [U_3(x, y, \tau) - T_{кл}] \quad (5)$$

$$-\lambda \frac{\partial U(x, y, \tau)}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0, \quad (6)$$

и начальным распределением температуры

$$U(x, y, 0) = T_{oc} - 4\Delta T_1 \cdot \left(\frac{\Delta x}{B}\right)^2 - 4\Delta T_2 \cdot \left(\frac{\Delta y}{D}\right)^2 \quad (7)$$

где $U(x, y, \tau)$ – неизвестная функция распределения температуры в охлаждаемом слитке; x, y – координаты по ширине и толщине слитка, м, соответственно; τ – пространственная координата, с; B, D – ширина и толщина слитка, м, соответственно; $c = c(T)$ – удельная теплоемкость металла, Дж/(кг · К); $\rho = \rho(T)$ – плотность металла, кг/м³; $\lambda = \lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности металла, Вт/(м·К); $\alpha_{к,i}, \alpha_{изл,i}$ – коэффициент теплоотдачи конвекцией и излучением, Вт/(м²·К), соответственно; $T_c, T_{кл}$ – температура (среды) воздуха и кладки в рабочем пространстве термостата, К, соответственно; T_{oc} – начальная температура металла на оси слитка, К; $\Delta T_1 = T_{oc} - T_x$; $\Delta T_2 = T_{oc} - T_y$.

Полученную систему уравнений представляли в конечно-разностном виде и интегрировали численно с использованием неявной абсолютно устойчивой разностной схемы. Искомые сеточные функции вычисляли методом продольно-поперечной прогонки в итерационном цикле с использованием алгоритма, описанного в работе [2].

Величину коэффициента теплоотдачи конвекцией $\alpha_{к,i}$ в исследуемом интервале температур рассчитывали по известным эмпирическим зависимостям [3] и представляли в виде непрерывной монотонной убывающей функции с максимальной интенсивностью отвода теплоты на начальной стадии охлаждения металла. Значения коэффициента теплоотдачи излучением $\alpha_{изл,i}$ вычисляли по общепринятой методике [4]. Изменение значений теплофизических параметров стали в зависимости от температуры принимали согласно данным работы [5].

Адаптацию разработанной математической модели к реальным условиям охлаждения металла в исследуемых агрегатах производили путем сопоставления расчетных данных о температуре металла с результатами экспериментального ее изучения на различных этапах процесса охлаждения. Результаты расчетов теплового состояния металла, выполненных на ПЭВМ, качественно согласуются с данными физического измерения тем-

пературы центральных и поверхностных слоев слитков, располагаемых в различных зонах рабочего пространства термостата, а также позволяют подтвердить количественное совпадение температуры на различных стадиях охлаждения металла, что свидетельствует о достаточной корректности разработанной модели. При этом величина отклонений расчетных значений температуры металла от измеренных на различных стадиях его охлаждения является соизмеримой с погрешностью расчетной и измерительной схем, а, следовательно, позволяет использовать предложенную модель для объективной оценки условий охлаждения слитков.

Последующими вычислительными экспериментами, проведенными при помощи разработанной модели, выявлено, что равномерное понижение температуры поверхности металла достигается соответствующим подбором значений локального коэффициента теплоотдачи конвекцией, характеризующего интенсивность отвода теплоты с боковых и верхней граней слитков. Искомые величины определяли путем решения обратной задачи теплопроводности в двумерной нелинейной постановке по программе, разработанной для ПЭВМ с учетом двустороннего отвода теплоты от поверхности слитков на различных стадиях охлаждения в термостатах и допустимого уровня интенсивности ее отвода. В дальнейшем это позволило установить, что слитки, охлаждаемые в термостатах, после выплавки в печах электрошлакового переплава выгружать из рабочего пространства термостатов целесообразно значительно раньше (на 7...8 ч), чем предусмотрено технологической инструкцией. Такое сокращение длительности данного процесса достигается увеличением (до 20...25 град/ч) скорости охлаждения поверхностных слоев металла в интервале температур 550...400 °С без опасности его разрушения.

Для различных марок хромоникелевых сталей выполняли вычисления² средних скоростей охлаждения слитков и далее, используя известные значения перепада температуры по сечению слитков, рассчитывали (с учетом зависимости модуля упругости и коэффициента линейного расширения стали от температуры) максимальные термоупругие напряжения, величина которых определяет допустимые скорости охлаждения.

Исследования напряженного состояния слитков стали марок 1X18H97 и 14X17H2, охлаждаемых в термостатах, показали, что в интервалах температуры 600...800 °С (при $\vartheta_{\text{охл}} = 50...60$ град/ч) и 400...600 °С (при $\vartheta_{\text{охл}} = 20...35$ град/ч) максимальное значение осевых сжимающих термоупругих напряжений $\sigma_{\text{max}}(\Delta T)$ ниже предела прочности $\sigma_{\text{в}}(T)$ исследуемых сталей на 8...10 % и на 6...8 % соответственно, а, следовательно, не является фактором, ограничивающим скорость понижения температуры

² с участием С.Е.Чижова и А.В.Шперного

металла. Это подтверждает возможность более интенсивного охлаждения слитков и позволяет использовать скорости понижения температуры металла, приведенные в табл. 1 и 2.

Реализацию усовершенствованных режимов охлаждения слитков в термостатах можно осуществлять путем принудительного обдува поверхности металла воздушными потоками, нагнетаемыми вентиляторами центробежного типа с регуляторами расхода воздуха, обеспечивающими заданное понижение температуры поверхности металла.

Для испытания предложенных режимов охлаждения в производственных условиях один из термостатов ОАО «Электрометаллургический завод «Днепрспецсталь» оборудовали центробежным вентилятором производительностью $3 \cdot 10^3$ м³/ч. Результаты серии опытно-промышленных испытаний подтвердили достаточно равномерное охлаждение слитков и минимальный уровень остаточных напряжений, при этом нарушение сплошности металла не наблюдается. Внедрение скорректированных режимов охлаждения позволило сократить продолжительность данной операции и повысить пропускную способность термостатов.

В результате выполненных исследований изучено распределение температуры в слитках специальных марок стали, охлаждаемых в термостатах после выгрузки из кристаллизаторов электропечей и рабочего пространства рециркуляционных печей с выдвижным подом. Предложены рациональные режимы охлаждения слитков, ориентированные на повышение пропускной способности данных агрегатов.

Список литературы

1. Тайц Н.Ю. Технология нагрева стали. - М.: Металлургия, 1962. - 259 с.
2. Баздырев В.С., Иванов В.И., Усенко Ю.И., Матказина Р.Р. Экспериментально-расчетное исследование охлаждения листовых слитков в электрических колодцах / Металлургия (Труды ЗГИА). - Запорожье: ЗГИА, 1999. - Вып. 2. - С.89-94.
3. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. - М.: Энергия, 1973. - 319 с.
4. Расчеты нагревательных печей / Под ред. Н.Ю.Тайца. - Киев: Техника, 1969. - 540 с.
5. Казанцев Е.И. Промышленные печи: Справочное руководство для расчетов и проектирования. - М.: Металлургия, 1975. - 368 с.

**© Усенко Ю.И., Иванов В.И., Сапов В.Ф.,
Коваль Н.В., Тищенко П.И., Тимошенко С.Н. 2005**