

УДК 669.18

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛРАЗЛИВОЧНОГО КОВША И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРОИЗВОДСТВА

Харламов Д.А., Масягина Н.И.

ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова»,  
Губкинский филиал, Губкин, e-mail: docktn@bk.ru

На основе промышленных данных измерения температур футеровки сталеразливочного ковша в разных точках и жидкой стали, рассмотрен тепловой профиль ковша. Рассмотрены особенности применения в футеровке стальной магнезитоуглеродистых огнеупоров. Учтены особенности протекания стационарных и нестационарных процессов передачи тепла в процессе эксплуатации ковшей. Собранный материал относится к большегрузным ковшам емкостью 70 и 150 т. Представлена математическая модель теплового состояния ковша и проведены расчеты по ней. Произведены расчеты тепловых потерь и скорости охлаждения металла на таких этапах обработки, как выпуск из печи, транспортировка, выдержка, обработка в агрегате ковш-печь, обработка на установке вакуумирования, разливка. Проанализировано влияние параметров модели на такие технико-экономические показатели производства, как удельный расход электроэнергии в цехе, время обработки. Установлены зависимости падения температуры жидкой стали в ковше, нагретом в течение различного времени до различных температур. Превышение температуры брони ковша может стать причиной повреждения футеровки и привести к прорыву стали через кожу ковша. Показаны пути повышения технико-экономических показателей производства при совершенствовании тепловых режимов работы сталеразливочных ковшей.

**Ключевые слова:** ковш, огнеупорная футеровка, температура, энтальпия, агрегат ковш-печь

## MATHEMATICAL MODELING OF THE THERMAL STATE OF THE STEEL LADLE AND ITS INFLUENCE ON THE TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS OF PRODUCTION

Kharlamov D.A., Masyagina N.I.

V.G. Shukhov Belgorod State Technological University, Gubkin branch, Gubkin, e-mail: docktn@bk.ru

Based on the industrial data of measuring the temperatures of the lining of the steel ladle at different points and liquid steel, the thermal profile of the ladle is considered. The features of the use of magnesite-carbon refractories in the lining of steel-coated steel are considered. The peculiarities of the flow of stationary and non-stationary heat transfer processes during the operation of ladle are taken into account. The collected material belongs to heavy-duty ladles with a capacity of 70 and 150 tons. A mathematical model of the thermal state of the ladle is presented and calculations are carried out on it. Calculations of heat losses and the cooling rate of the metal at such processing stages as the tapping from the furnace, transportation, exposure, processing in the ladle-furnace unit, processing on the vacuuming unit, casting. The influence of the model parameters on such technical and economic indicators of production as the specific consumption of electricity in the workshop, processing time is analyzed. The dependences of the temperature drop of liquid steel in a ladle heated for different times to different temperatures are established. Exceeding the temperature of the ladle armor can cause damage to the lining and lead to a breakthrough of steel through the ladle casing. The ways of increasing the technical and economic indicators of production with the improvement of thermal modes of operation of steel ladles are shown.

**Keywords:** ladle, refractory lining, temperature, enthalpy, ladle-furnace unit

Актуальной проблемой на металлургических комбинатах является своевременный контроль работы огнеупорной футеровки агрегатов, контактирующей с высокотемпературным расплавом [1]. При этом имеют место частые прорывы стали через кожу ковша. В этой связи на сталеплавильных заводах было проведено определение термической работы ковша с магнезиально-углеродистым рабочим слоем.

Рассмотрены результаты замеров [2] в большегрузных ковшах емкостью 70 т (на заводе в Витковице, VHM, Чехия) и 150 т (Россия). Предприятия занимаются изготовлением продукции для машиностроительного производства. Сталь в производстве выплавлялась в дуговой сталеплавильной печи (ДСП) с последующей обработкой

в агрегате ковш-печь (АКП) и вакуумной дегазацией (ВД), с последующей разливкой в слитки.

### Материалы и методы исследования

Целью измерений была оценка температурного профиля ковша в течение всего его рабочего цикла, определение изменения энтальпии ковша во времени, в соответствии с измеренными температурами, и расчет снижения температуры стали в ковше в результате тепловых потерь футеровки.

На металлургических заводах имеет место частое повреждение футеровки ковша, с дальнейшим прорывом стали через кожу ковша. При этом стенка ковша повреждается, а дно ковша работает без затруднений. Рабочий слой футеровки ковша имеет не-

равномерный износ. В этой связи стенки ковша (включая шлаковый пояс) были выложены более качественными магнезиально-углеродистыми фасонными кирпичами, имеющими большую толщину, по сравнению с нижней частью. Следующими слоями облицовки стен являются магнезиальный порошок, литой бетон, слой шамотной глины, изолирующий слой и стальная броня.

Применение в футеровке АКП магнезиоуглеродистых огнеупоров приводит к росту температуры кожуха ковша и потерь тепла теплопроводностью. Поэтому решением для снижения теплопотерь через футеровку является применение комбинированных магнезиоуглеродистых огнеупоров, в которых рабочая поверхность имеет содержание углерода более 17%, а вторая часть, примыкающая к арматурному слою, – менее 5%. Несмотря на некоторое увеличение теплопотерь, магнезиоуглеродистые огнеупоры по сравнению с высокоглиноземистыми изделиями позволяют повысить стойкость футеровки примерно в два раза.

Результаты эксплуатационного эксперимента были обработаны моделью для расчета тепловых процессов внутри ковша, которая может определять изменение энтальпии футеровки ковша и тепловых потерь через футеровку, на основе изменений температуры в местах измерения в футеровке и других технологических данных о контролируемой плавке.

Измерение температуры поверхности ковша проводили с помощью пирометра 35CC51 с цифровым индикатором 35PA10, пределы измерения 600–1200°C, погрешность 1%, с регулируемой излучательной способностью на значении 0,95. Измерение с помощью пирометра было соотнесено с оценкой температуры футеровки в зависимости от времени и этапа тепловой работы ковша.

Измерение температуры жидкого металла производили платино-родиевыми термопарами ПР30/6.

### Результаты исследования и их обсуждение

Температурный режим футеровки ковша был нанесен на несколько графиков. На рис. 1 представлены температуры внутри футеровки во время процесса сушки футеровки ковша перед первым наливом жидкого металла из печи.

Из рис. 1 следует, что рост температуры и энтальпии в начальный период нагрева (до 4 ч) идет неравномерно, что связано с протеканием нестационарного режима. После этого времени наблюдается практически постоянный прирост указанных величин, в связи с переходом на стационарный режим.

Потери тепла через кладку складываются из стационарных и нестационарных потерь. Для их определения необходимо рассчитать температурное поле в кладке, с учетом начальных условий. Циклические изменения температуры ковша в процессе налива, рафинирования, ремонта и подогрева усложняют определение данных тепловых потоков.

Плотность теплового потока от стали к футеровке в стационарном состоянии постоянна, а для определения нестационарных тепловых потоков наиболее распространены являются экспоненциальные функции, которые имеют общий вид

$$q_{н.ст.} = q_0 \cdot e^{-k\tau},$$

где  $q_0$  – начальный тепловой поток от стали к футеровке ковша при выпуске из печи;  $k$  – неизвестный коэффициент, который рассчитывают из «предыстории» ковша по известным опорным точкам с учетом  $q_0$ ;  $\tau$  – время, с.

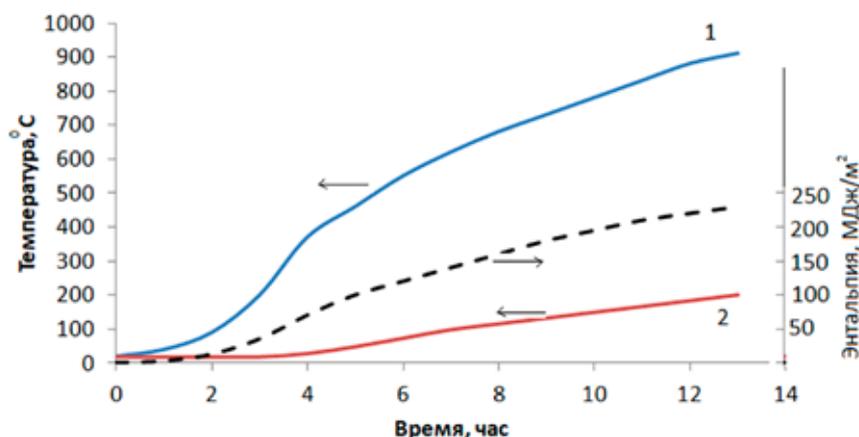


Рис. 1. Температура внутри футеровки ковша в процессе сушки

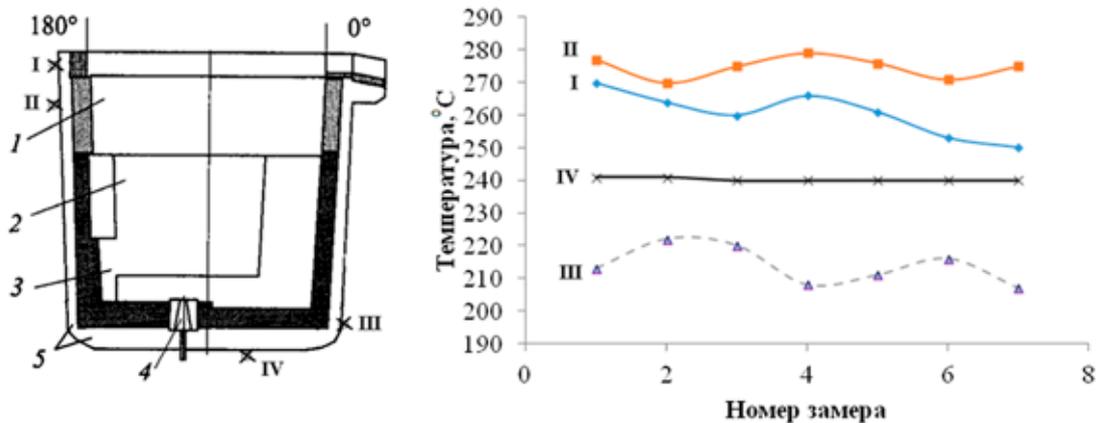


Рис. 2. Футеровка АКП и результаты измерения температуры брони ковша: I – зона свободного борта, II – шлаковый пояс, III – закругление днища ковша, IV – днище ковша; 1 – зона усиления шлакового пояса, 2 – усиление стены в зоне работы продувочного блока, 3 – усиление бойной стены, 4 – пористая продувочная пробка, 5 – броня ковша

Тепловые потери через футеровку также исследовали с помощью измерений температуры внешней поверхности брони ковша, в четырех точках, как показано на рис. 2. Результаты замеров и характеристика ковшей приведены на рис. 2.

Из анализа данных рис. 2 следует, что наибольшая температура брони ковша – в районе шлакового пояса, где температура металла и шлака максимальна вследствие нагрева электрическими дугами. В районе днища ковша температура меньше на 30–40°C вследствие более высокой толщины огнеупорной футеровки в этом месте, а также из-за охлаждающего действия аргона. Увеличение износа ковша также приводит к росту температуры брони на 20–30°C. Изменение температуры брони во времени меняется незначительно ( $\pm 10^\circ\text{C}$ ), объясняется достаточным прогревом футеровки перед выпуском металла из печи и длительным нахождением металла в ковше в процессе внепечной обработки.

В процессе работы в сталеплавильных цехах ковш проходит следующие стадии эксплуатации: прогрев футеровки при высокой температуре (с помощью горелок или электронагрева), выпуск металла из печи в ковш, транспортировка заполненного ковша, внепечная металлургия в печи-ковше, вакуумная дегазация, разливка, охлаждение на воздухе (перед выпуском, после разливки стали) и охлаждение под крышкой. В качестве наиболее подходящего параметра для определения теплового состояния ковша может быть выбрана энтальпия футеровки. Эта величина является функцией времени и обычно задается уравнением

$$H(\tau) = \int_V t(x, y, z, \tau) \cdot c_p(t) \cdot \rho_V dV, \quad (1)$$

где  $H(\tau)$ , (Дж) – энтальпия футеровки в текущий момент времени  $\tau$ ;

$t(x, y, z, \tau)$  – температура футеровки по координатам  $x, y, z$  и момент времени  $\tau$ ;

$c_p(t)$ , (Дж/(кг·К)) – удельная теплоемкость, как функция от температуры  $t$ ,

$V$ , ( $\text{м}^3$ ) – объем футеровки ковша,

$\rho_V$ , ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ) – плотность футеровки ковша.

Поскольку  $c_p$  зависит от температуры, функция  $H(\tau)$  также характеризует изменение аккумулирующих свойств футеровки в зависимости от ее температуры. Для расчета энтальпии футеровки ковша в первую очередь важно знать изменения температуры в рабочем слое футеровки.

Потери тепла через футеровку определяются как интегральная величина, которая зависит от полного времени тепловой работы футеровки ковша. Снижение температуры стали, вызванное тепловыми потерями через футеровку в текущий момент времени, определяется соотношением

$$\Delta t_c = Q_\phi / (m_c \cdot c_c), \quad (2)$$

где  $Q_\phi$ , (Дж) – тепловые потери через футеровку за рассматриваемый промежуток времени;  $m_c$ , (кг) – масса стали в ковше;  $c_c$ , (Дж/(кг·К)) – удельная теплоемкость стали.

Потери тепла через футеровку ковша можно оценить методами регрессионного анализа.

Информация о скорости изменения температуры стали, связанной с тепловыми потерями через футеровку ковша, была проанализирована на отдельных участках методом регрессионного анализа, в виде линейной зависимости от энтальпии футе-

ровки ковша при выпуске. Использовалась зависимость в следующем виде:

$$v_c^n = a + b \cdot H_0, \quad (3)$$

где  $H_0$  – энтальпия стенки футеровки ковша при выпуске ( $\text{МДж}/\text{м}^2$ );  $a, b$  – константы модели для расчета изменения температуры стали в ковше, соответственно, для модели потерь тепла через футеровку ковша для заданного этапа обработки,  $n$ .

Общее изменение температуры стали, вызванное тепловыми потерями через футеровку ковша, может быть рассчитано из соотношения

$$\Delta t_c = \sum_1^n v_c^n \cdot \Delta \tau^n, \quad (4)$$

где  $\Delta \tau^n$  (мин) – длительность  $n$ -го этапа обработки.

Путем суммирования уравнений (3) для каждого этапа обработки может быть получена зависимость  $\Delta t_c$  от времени.

Тепловые потери через футеровку ковша определяются на отдельных этапах обработки. Весь временной отрезок между выпуском плавки и окончанием разлива был разделен на 8 этапов:

- 1) этап: выпуск стали из печи в ковш,
- 2) этап: 10 мин после окончания выпуска стали,
- 3) этап: время до начала обработки в ковшовой печи,
- 4) этап: обработка в ковшовой печи,
- 5) этап: транспортировка ковша от печи-ковша до вакуумной станции,
- 6) этап: обработка в вакууме,
- 7) этап: транспортировка ковша от вакуумной станции до разлива,

8) этап: литье в слитки.

Рассчитанные коэффициенты для модели изменения температуры стали на конкретных технологических участках в зависимости от энтальпии ковша перед выпуском приведены в таблице. Анализ таблицы показывает, что скорость охлаждения металла уменьшается при переходе от одного этапа к другому, в связи с уменьшением тепловых потерь через футеровку.

Коэффициенты для расчета изменения температуры стали в ковше

Этап	Коэффициенты для расчета тепловых потерь через футеровку ковша	
	a	b
1	31,09	$-4,89 \cdot 10^{-2}$
2	16,61	$-2,33 \cdot 10^{-2}$
3	14,62	$-1,93 \cdot 10^{-2}$
4	10,29	$-1,49 \cdot 10^{-2}$
5	2,43	$-2,50 \cdot 10^{-3}$
6	1,93	$-2,40 \cdot 10^{-3}$
7	1,09	$-1,40 \cdot 10^{-3}$
8	0,44	$-6,00 \cdot 10^{-4}$

В работе установлено [3, 4] влияние температуры нагрева футеровки ( $T_\phi, ^\circ\text{C}$ ) для 150 т ковша и температуры выпуска стали из печи ( $T_b, ^\circ\text{C}$ ) на суммарный удельный расход электроэнергии в ДСП и АКП ( $Q_\Sigma, \text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$ ) при выплавке и доводке стали 20:

$$Q_\Sigma = 0,46T_b - 149 \text{ при } T_\phi < 900^\circ\text{C};$$

$$Q_\Sigma = 0,51T_b - 235 \text{ при } 900 < T_\phi < 1100^\circ\text{C}.$$

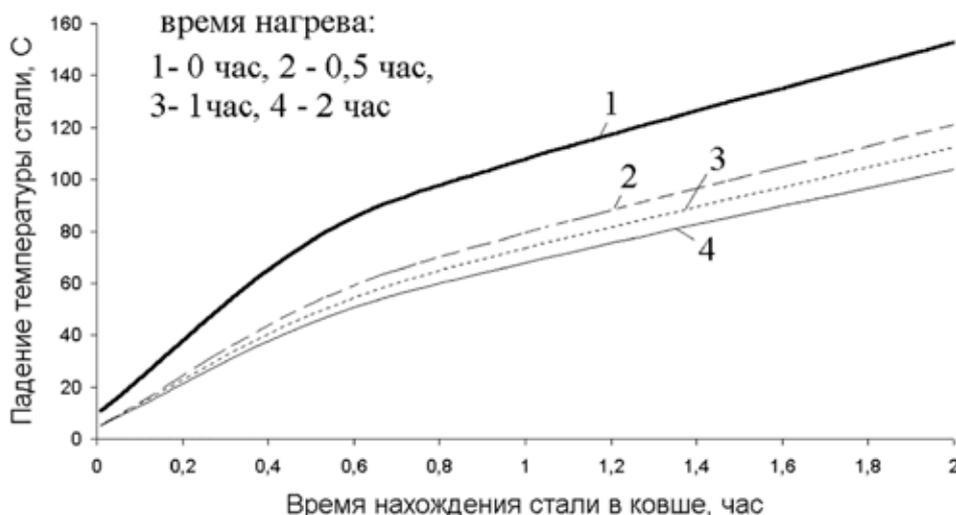


Рис. 3. Зависимость падения температуры жидкой стали в ковше, нагретом в течение различного времени до  $900^\circ\text{C}$ , при температуре стали  $1650^\circ\text{C}$

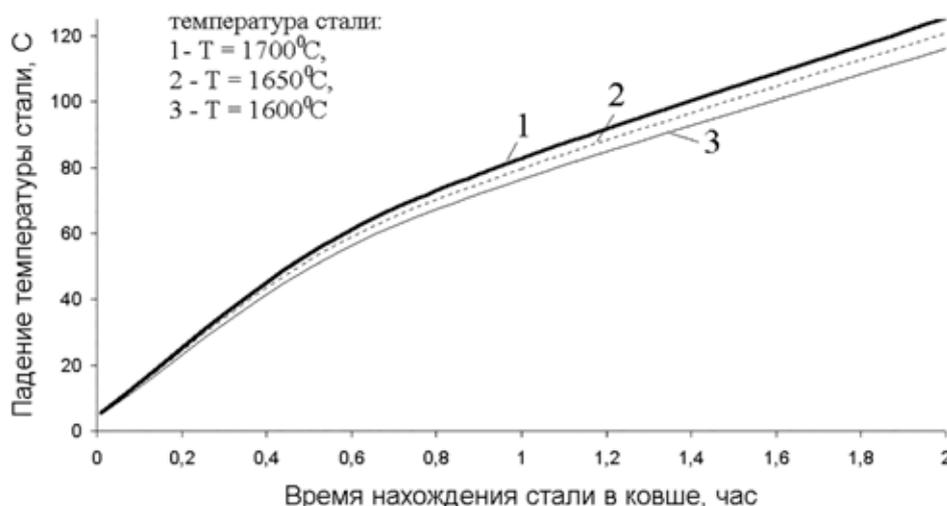


Рис. 4. Зависимость падения температуры жидкой стали в ковше, имеющей различную температуру. Время предварительного нагрева ковша до  $900^{\circ}\text{C}$  – 0,5 ч

Таким образом, из этих данных следует, что увеличение  $T_{\phi}$  более  $900^{\circ}\text{C}$  приводит к сокращению расхода электроэнергии примерно на 12 кВт·ч/т.

Расчеты теплового баланса АКП показали, что с увеличением номера нагрева в ковше уменьшается доля аккумулированной энергии ковша ( $Q_{\text{акк}}$ ):

Номер нагрева	1	2	3
$Q_{\text{акк}}, \%$	10,3	8,7	7

В результате моделирования получены зависимости падения температуры стали при выдержке металла в ковше в течение различного времени (рис. 3, 4).

Как следует из данных рис. 3, увеличение времени выдержки приводит к росту тепловых потерь и падению температуры стали. При этом ковш, предварительно нагретый в течение 2 ч, забирает тепла примерно в 1,5 раза меньше по сравнению с холодным ковшом.

Как следует из данных рис. 4, увеличение времени выдержки приводит к росту тепловых потерь и падению температуры стали. При этом увеличение температуры стали с  $1600^{\circ}\text{C}$  до  $1700^{\circ}\text{C}$  приводит к незначительному росту тепловых потерь и падению температуры примерно на  $10^{\circ}\text{C}$  в течение 2 ч.

### Заключение

Произведены расчеты на математической модели теплообмена в системе жид-

кая сталь – футеровка ковша. Установлено, что увеличение продолжительности выпуска металла из ДСП [5] приводит к росту падения температуры жидкой стали. Увеличение температуры стали на выпуске с  $1600$  до  $1700^{\circ}\text{C}$  приводит к дополнительному охлаждению металла вследствие потерь излучением примерно на  $10^{\circ}\text{C}$ .

В результате расчетов получено, что увеличение времени выдержки приводит к росту тепловых потерь и падению температуры стали. При этом увеличение температуры нагрева ковша с  $800$  до  $1200^{\circ}\text{C}$  приводит к уменьшению охлаждения жидкой стали примерно на  $20^{\circ}\text{C}$  в течение 2 ч.

Анализ полученных промышленных данных свидетельствует о том, что теплотери в системе металл – ковш возрастают с увеличением количества наливов в ковш и уменьшением температуры его подогрева перед выпуском из печи. Увеличение времени и температуры предварительного подогрева 150 т ковша позволит сократить расход электроэнергии на 25–30 кВт·ч/т.

Обеспечение температуры футеровки ковша в пределах  $900$ – $1100^{\circ}\text{C}$  возможно за счет использования высокоскоростных горелок на стендах разогрева, а также путем обеспечения ритмичной работы сталковшей после разливки стали. Однако в производственных условиях применению такого режима мешают следующие факторы: остывание сталковша в случае затягивания сталеразливочных стаканов в процессе разливки стали; устаревшее крановое оборудование и его повышенная загруженность, а также человеческий фактор.

**Список литературы**

1. Краснянский М.В., Кац Я.Л. Совершенствование теплового режима эксплуатации сталеразливочных ковшей // *Электromеталлургия*. 2016. № 4. С. 2–10.
2. Меркер Э.Э., Черменев Е.А. Электроплавка металлизированных окатышей в дуговой печи. Старый Оскол: ТНТ, 2017. 218 с.
3. Харламов Д.А. Управление процессом электроплавки в дуговой печи и в агрегате ковш-печь (АКП) с непрерывной подачей железорудного металлизированного сырья (ЖМС) в сварочную зону // *Транспортное машиностроение*. 2023. № 3. С. 30–36.
4. Точилкин В.В., Камалихина З.В., Котов И.В., Точилкин В.В. Развитие конструкций для разлива стали системы сталеразливочный ковш – промежуточный ковш – кристаллизатор МНЛЗ // *Механическое оборудование металлургических заводов*. 2020. № 2 (15). С. 27–30.
5. Запольская Е.М., Темлянец М.В., Григорьев А.В. Исследование влияния температурных режимов на параметры тепловой работы стенов разогрева футеровки сталеразливочных ковшей // *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2019. № 2 (28). С. 7–10.