

12. Шульц, Л.А. Современное состояние и развития систем удаления, использования и очистки газов крупнотоннажных высокомошных электродуговых печей / Л.А. Шульц, Ю.М. Кочнов, М.Ю. Кочнов // Черные металлы. – 2006. – № 10. – С. 18–29.

13. Редюгер, Маргаф. Универсально применимые системы плоскорукавных фильтров для всех отраслей промышленности (LUNRFILTERGmbH&Co.KG) / Маргаф Редюгер // Пылегазоочистка. – 2012. – № 3. – С. 6–9.

14. Кузьмин, М.Г. Новые технические решения для обработки паропылегазовых смесей в газоходах дуговых сталеплавильных печей / М.Г. Кузьмин, В.С. Чередниченко, Р.А. Бикеев // Электроталлургия. – 2013. – № 7. – С. 11–17.

15. Кочнов, М.Ю. Анализ работы систем удаления и очистки газов крупнотоннажных дуговых сталеплавильных печей с целью разработки путей повышения из энерго-экологической эффективности: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.02 / М.Ю. Кочнов; Нац. иссл. технолог. ун-т. «МИСиС». – Москва, 2010. – 26 с.

УДК 669.045

С.В. КОРНЕЕВ, канд. техн. наук (БНТУ)

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ФУТЕРОВКИ СТАЛЕРАЗЛИВОЧНОГО КОВША

Целью исследований является определение температур на поверхности и внутри футеровки ковша в условиях циклического нагрева и охлаждения в процессе его работы, а также прогнозирование снижения температуры жидкой стали за время нахождения его в ковше в зависимости от его состояния и времени. В качестве примера рассмотрим сталеразливочный ковш в условиях электросталеплавильного производства на примере БМЗ.

Конструкция сталеразливочного ковша представлена на рисунке 1.

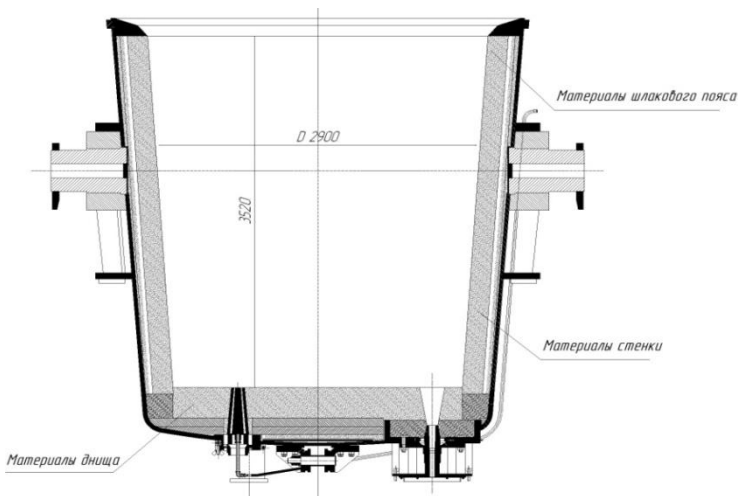


Рисунок 1 – Конструкция сталеразливочного ковша

Исходные данные для расчета были приняты следующие:

1. Размеры стальнойковша (100-т): внутренний диаметр 2900 мм; высота внутреннего пространства 3520 мм.

2. Материалы стен и шлакового пояса: толщина стального кожуха 30 мм (сталь); толщина теплоизоляционного слоя 10 мм (КВК–400); толщина арматурного слоя 80 мм (МКС – 72); толщина рабочего слоя 178 мм (ПУк 93-10-к или DALCAST A90).

3. Материалы днища: толщина стального кожуха 30 мм (сталь); толщина арматурного слоя 40 мм (МКС – 72); толщина арматурного слоя 65 мм (ША-I); толщина выравнивающего слоя 4 мм (ППФ–1); толщина рабочего слоя 300 мм (ПУк 93-10-к или DALCAST A90).

Стойкость ковшей с рабочим слоем из периклазоуглеродистого кирпича составляет в среднем 60 плавков, скорость износа около 3 мм за плавку.

Основной состав огнеупорных и теплоизоляционных материалов:

- периклазоуглеродистый кирпич ПУк 93-10-к ($MgO \geq 93 \%$, $C - 10-15 \%$, плотность $\geq 2800 \text{ кг/м}^3$); - высокоглиноземистый бетон DALCAST A90 ($Al_2O_3 \geq 90 \%$, $MgO \sim 7 \%$, $CaO \leq 1,5 \%$, $SiO_2 \leq 1 \%$, плотность $\geq 2800 \text{ кг/м}^3$); - муллито-корундовый среднеплотный кирпич МКС – 72 ($Al_2O_3 \geq 72 \%$, Fe_2O_3 не более 1,5 %); - перикла-

зовый порошок на фосфатной связке ППФ-1 ($MgO \geq 87\%$, $P_2O_5 - 1,7-3,2\%$); - шамотный кирпич ША-I ($Al_2O_3 \geq 30\%$); - теплоизоляционные плиты КВК-400 ($Al_2O_3 = 45\%$, $Al_2O_3 + SiO_2 = 95\%$).

Теплофизические характеристики всех материалов определены по различным литературным источникам [1, 2 и др.] и сведены в таблицы 1 и 2.

Таблица 1 – Коэффициенты теплопроводности огнеупорных и теплоизоляционных материалов, применяемых в футеровке сталеразливочного ковша в температурном интервале их работы

Огнеупорный материал	Плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К)
Периклазоуглеродистый кирпич ПУк 93-10-к	2880	$16,3 - 5,1 \cdot 10^{-3}t$
Бетон DALCAST A90	2850	$3,6 - 0,8 \cdot 10^{-3}t$
ППФ-1	1700	$2,8 - 0,1 \cdot 10^{-3}t$
МКС-72	2500	$2,7 - 0,6 \cdot 10^{-3}t$
Шамот ША-I	2000	$0,84 + 0,58 \cdot 10^{-3}t$
Теплоизоляционный КВК-400	400	0,07

Таблица 2 – Значения удельной теплоемкости огнеупорных и теплоизоляционных материалов применяемых в футеровке сталеразливочного ковша

Огнеупорный материал	Плотность, кг/м ³	Удельная теплоемкость c_p , кДж/(кг·К)
Периклазоуглеродистый кирпич ПУк 93-10-к	2880	$1,08 + 0,29 \cdot 10^{-3}t$
Бетон DALCAST A90	2850	$0,93 + 0,21 \cdot 10^{-3}t$
МКС-72	2500	$0,91 + 0,22 \cdot 10^{-3}t$
Шамот ША-I	2000	$0,88 + 0,23 \cdot 10^{-3}t$
Теплоизоляционный КВК-400	400	$0,89 + 0,22 \cdot 10^{-3}t$

Физико-математическая модель

Уравнение теплопроводности для расчета теплового состояния ковша имеет вид:

$$\rho_j(T)c_{pj}(T)\frac{\partial T_j}{\partial \tau} - \nabla \cdot (\lambda_j \nabla T) = Q, \quad (1)$$

где j – индекс рассматриваемого материала, ρ_j – плотность материала; c_{pj} – изобарная теплоемкость материала; T_j – температура; τ – время; λ_j – коэффициент теплопроводности, Q – источник генерируемой теплоты.

Граничные условия в рассматриваемой задаче:

– заданная температура (условие Дирихле)

$$T_j = T_0 = \text{const}; \quad (2)$$

– тепловой поток (условие Неймана)

$$\vec{n} \cdot (\lambda_j \nabla T) = \alpha_j(T)(T_c - T_j(\tau)) + C_{\text{изл}}(T_c^4 - T_j(\tau)^4); \quad (3)$$

– тепловая изоляция или симметрия

$$\vec{n} \cdot (\lambda_j \nabla T) = 0, \quad (4)$$

где $T_j(\tau)$ – температура поверхности; T_c – температура среды.

Для рассматриваемого процесса первоначально задаем равномерное распределение температуры внутри объектов в начальный момент времени, т.е. $T_j = T_0 = \text{const}$. Начальное распределение температуры по футеровке перед выпуском металла из печи является решением стационарной задачи нагрева ковша до температуры внутренней поверхности, равной 1000 °С на стенде подогрева.

При расчете охлаждения ковша учитываем взаимное излучение поверхностей.

Для серых тел радиационный поток можно записать в следующем виде

$$q_j = \varepsilon_j(P_j - \sigma T_j^4), \quad (5)$$

где ε_j – излучательная способность поверхности тела; P_j – полный, падающий на поверхность тела, радиационный поток; σ – постоянная Стефана-Больцмана; T_j – температура поверхности тела.

Полный падающий на поверхность тела радиационный поток

$$P_j = P_{mj} + F_{aj}\sigma T_{cj}^4, \quad (6)$$

где P_{mj} – взаимное излучение, приходящее от всех поверхностей в модели, Вт/м²; F_{aj} – коэффициент облученности, равный доле области пространства, не покрытой другими поверхностями и изменяющийся в пределах от 0 до 1; T_{cj} – температура удаленного источника (среды).

В качестве упрощения по отношению к реальным условиям эксплуатации в модели не учитывается дополнительный разогрев футеровки дугами в верхней части ковша в районе шлакового пояса при обработке металла на агрегате печь-ковш. Рабочее пространство ковша принято цилиндрическим. Из геометрии модели также исключены продувочные фурмы и сталевыпускное отверстие. Это позволяет при необходимости использовать для данной задачи вместо 3D геометрии модель 2D геометрии с радиальной симметрией.

Для определения теплового состояния ковша используется решение задачи нестационарной теплопроводности с граничными условиями, соответствующими условиям эксплуатации ковша. При нахождении жидкой стали в ковше температура на внутренней поверхности рабочего пространства ковша на несколько градусов ниже усредненной по объему температуры жидкой стали. Температура жидкой стали изменяется во времени от выпуска стали из электродуговой печи до окончания разливки ковша на машине непрерывного литья заготовки в пределах 1650–1560 °С (для упрощения анализа в дальнейшем температура принята постоянной и равной 1620 °С). Таким образом, на внутренней поверхности задается условие конвективного теплообмена жидкого металла с поверхностью с коэффициентом теплоотдачи, характерным для контакта поверхности с жидким металлом. При отсутствии жидкого металла в ковше охлаждение внутренней поверхности осуществляется преимущественно за счет теплового излучения в окружающую среду с учетом переизлучения энергии между поверхностями. Данная составляющая существенно зависит от температуры в рассматриваемом интервале. Конвективная составляющая зависит

от температуры, однако составляет небольшую долю в общем теплообмене.

На внешней поверхности ковша также задаются конвективный и радиационный тепловые потоки, зависящие от температуры поверхности. Степень черноты материала футеровки принята постоянной и равной $\varepsilon = 0,88$, кожуха $\varepsilon = 0,95$. Коэффициенты теплоотдачи конвекцией от поверхности к воздуху определялись в зависимости от температуры поверхности и ее расположения.

Решение поставленной задачи производилось с использованием метода конечных элементов. Начальное распределение температур в ковше задано по результатам решения стационарной задачи теплопроводности с постоянной температурой внутренней поверхности ковша, равной $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ (после стенда предварительного разогрева).

Схема движения ковша в рассматриваемой задаче:

1) старт (ковш нагрет на стенде до стационарного состояния с температурой внутренней поверхности $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$);

2) подача ковша под выпуск плавки из печи (длительность 5 мин);

3) ожидание выпуска плавки (длительность 18 мин);

4) контакт внутренней поверхности ковша с жидким металлом (температура внутренней поверхности ковша устанавливается близкой к температуре стали, время нахождения металла в ковше при внепечной обработке и разливке 118 мин);

5) слив шлака, очистка, подготовка шиберного затвора, ожидание (длительность 25 мин);

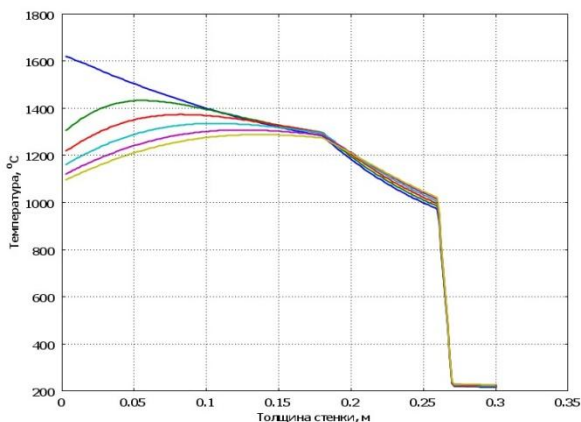
6) подача ковша под выпуск плавки без его подогрева (длительность 5 мин);

Далее цикл повторяется с пункта 3.

Таким образом, время выдержки металла в ковше принимаем 2 ч, охлаждение пустого ковша 48 мин.

На рисунке 2 представлены результаты расчета температурного поля по толщине футеровки стены в средней части при охлаждении ковша в течение 48 мин в первом цикле.

Наибольшее падение температуры внутренней поверхности ковша происходит в течение первых 20 мин, далее скорость охлаждения уменьшается. Это связано с тем, что тепловой поток излучением пропорционален температуре поверхности в четвертой степени.



(линии соответствуют времени от начального к конечному через 10 мин)

Рисунок 2 – Температурное поле по толщине футеровки стены в средней части при охлаждении ковша в течение 48 мин в первом цикле (рабочий слой – периклазоуглеродистый)

При охлаждении поверхности характерна неравномерность температуры по высоте стен и радиусу днища (рисунки 3 и 4).

Расчетами также определено, что температура внутренней поверхности изношенной стены (остаток периклазоуглеродистого рабочего слоя 1/3 от начальной толщины) после 48 минут охлаждения ниже в среднем на 93 °C по сравнению с температурой новой стенки.

Для рабочего слоя из высокоглиноземистого бетона характерны меньшие значения коэффициента теплопроводности, чем у периклазоуглеродистого кирпича, что с одной стороны приводит к снижению теплового потока, отбираемого от жидкого металла, а с другой стороны, снижает теплосодержание футеровки ковша и приводит к более быстрому снижению температуры внутренней поверхности опорожненного ковша. Температурное поле стенки ковша с высокоглиноземистым рабочим слоем после второго цикла представлено на рисунке 5.

Для выхода ковша на состояние с максимальным теплосодержанием необходимо около 5 циклов.

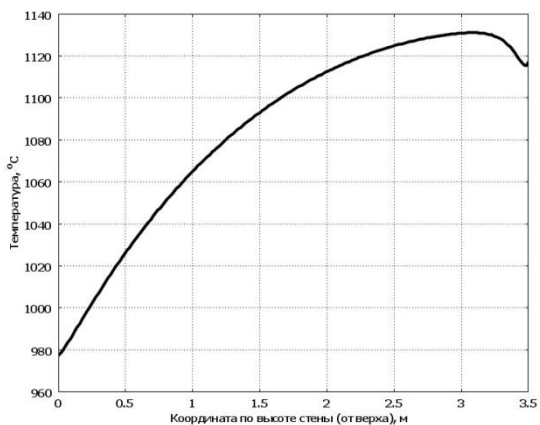


Рисунок 3 – Температура внутренней поверхности неизношенной стены (рабочий слой – периклазоуглеродистый) после 48 мин охлаждения

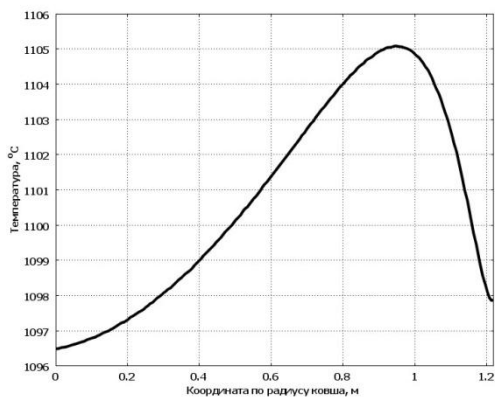
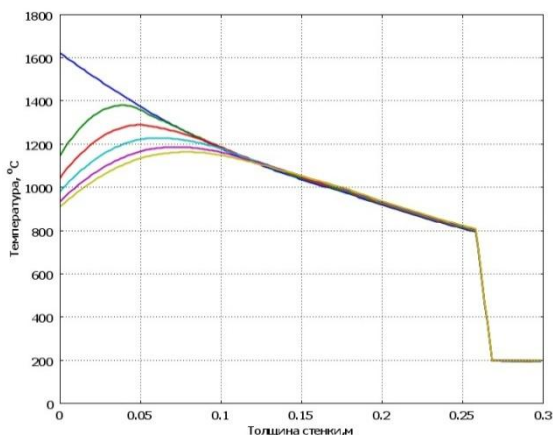


Рисунок 4 – Температура внутренней поверхности дна (рабочий слой – периклазоуглеродистый) после 48 мин охлаждения

По мере разогрева ковша с находящимся в нем металлом тепловой поток на внутренней поверхности снижается. Максимальный тепловой поток характерен для первого цикла работы ковша (после первоначального разогрева на стенде до температуры поверхности 1000 °C). Зависимость теплового потока на внутреннюю поверх-

ность ковша для стен и днаща от времени представлена на рисунке 6. При одинаковом времени оборота тепловой поток с каждым циклом будет уменьшаться.



(линии соответствуют времени от начального к конечному через 10 мин)

Рисунок 5 – Температурное поле по толщине футеровки стены в средней части при охлаждении ковша в течение 48 мин во втором цикле (рабочий слой – высокоглиноземистый)

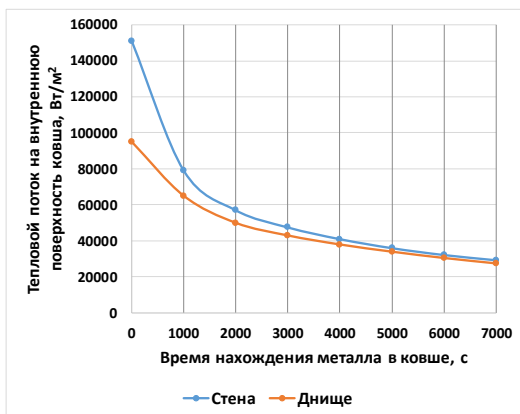


Рисунок 6 – Зависимость теплового потока на внутреннюю поверхность ковша в зависимости от времени нахождения жидкого металла в ковше от выпуска стали из печи (для первого цикла при рабочем слое из периклазуглеродистого кирпича)

Имея значения удельного теплового потока и значения площади внутренней поверхности стен (32 м^2) и днища ($6,6 \text{ м}^2$), можно определить мощность теплового потока, проходящего через внутреннюю поверхность ковша, а далее из уравнения баланса для металла определить снижение температуры жидкого металла в ковше. Для первого цикла падение температуры представлено на рисунке 7. Всего за время 7000 с потенциальное падение температуры составит $169 \text{ }^\circ\text{C}$. С каждым циклом падение температуры будет несколько уменьшаться, и после пятого цикла будет оставаться практически неизменным.



Рисунок 7 – Зависимость падения температуры стали в ковше от времени нахождения металла в ковше в первом цикле

Температура поверхности нового ковша с рабочим слоем из периклазоуглеродистого кирпича после стенда предварительного нагрева (стационарное состояние) составляет $188\text{--}196 \text{ }^\circ\text{C}$ (в разных точках по высоте). Максимальная температура поверхности ковша с металлом в начале эксплуатации (выход на состояние, близкое к стационарному) составляет $220\text{--}261 \text{ }^\circ\text{C}$. Аналогично для днища – $233\text{--}241 \text{ }^\circ\text{C}$.

Приближение к стационарному состоянию ковша с жидким металлом наступает не менее чем через 5 ч выдержки металла в ковше, или при 4 циклах с выдержкой металла в ковше в цикле, равном 2 ч. Максимальная температура поверхности нового ковша с

рабочим слоем из высокоглиноземистого бетона после стенда (стационарное состояние) составляет 130–172 °С, для днища – 164–179 °С. Максимальная температура поверхности ковша с металлом (с рабочим слоем из высокоглиноземистого бетона) в начале эксплуатации (выход на состояние, близкое к стационарному) составляет 168–227 °С, для днища – 205–224 °С.

Использование высокоглиноземистого бетона вместо периклазоуглеродистого кирпича приводит к снижению средней температуры на внешней поверхности с 240 °С до 205 °С. Максимальная температура поверхности изношенного (практически отсутствующий рабочий слой) ковша после стенда (стационарное состояние) составляет 189–204 °С, днища до 222 °С. Максимальная температура поверхности изношенного ковша с металлом в конце эксплуатации (выход на состояние близкое к стационарному) составляет 275–300 °С. Разность температур по высоте стен при подаче ковша на выпуск плавки для неизношенных стен составляет до 150 °С, а для изношенных до 220 °С, при этом разность температур по радиусу неизношенного днища около 8 °С. Причем быстрее охлаждается верхняя часть стен и центральная часть днища.

Таким образом, в результате моделирования определены особенности процесса нагрева и охлаждения ковша при его работе без промежуточного подогрева на стенде разогрева. Использование моделирования также позволяет определить снижение температуры стали в процессе выдержки стали в ковше, относящееся только к потерям теплопроводностью через стенку ковша и аккумуляцией энергии футеровкой.

Список литературы

1. **Огнеупорные материалы.** Структура, свойства, испытания: справочник / Й. Алленштейн [и др.]; под ред. Г. Роучка, Х. Вутнау; пер. с нем. – М.: Интермет Инжиниринг, 2010. – 392 с.
2. **Губинский, В.И.** *Металлургические печи: Учеб. пособие* / В.И. Губинский. – Днепропетровск: НМетАУ, 2006. – 85 с