

Н.В. Михайловский, С.В. Бейцун, С.И. Дёмин  
**ИССЛЕДОВАНИЕ НА ELCUT-МОДЕЛИ  
ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ФУТЕРОВКИ КОВША  
ПРИ ВЫПУСКЕ РАСПЛАВА**

*Аннотация.* Изменение температурного поля футеровки при постепенном заполнении ковша жидкой сталью получено в результате решения методом конечных элементов краевой задачи, описываемой эллиптическими дифференциальными уравнениями в частных производных, в программном пакете ELCUT.

*Ключевые слова:* выпуск расплава, температура футеровки ковша, метод конечных элементов.

**Постановка проблемы**

В настоящее время все больше технологических операций с жидким металлом осуществляют в сталеразливочных ковшах. При передаче ковша на разливку необходимо обеспечить довольно узкий диапазон температуры расплава. Существующие технические средства контроля не позволяют в производственных условиях постоянно контролировать его температуру в ковше, поэтому для управления технологическим процессом ее необходимо прогнозировать.

Снижение температуры расплава связано с тепловыми потерями на нагрев футеровки ковша, теплопередачей через нее и излучением с поверхности расплава. Выпуск металла производится в подготовленные ковши, которые предварительно разогревают на специальных стендах с целью снижения тепловых потерь расплава, а также уменьшения термического удара на футеровку ковша.

Прогнозирование изменения температуры расплава в ковше возможно только при наличии адекватных математических моделей, учитывающих тепловое состояние футеровки ковша перед выпуском.

Использование компьютерной модели теплового состояния ковша позволит принимать обоснованные решения о продолжительности последующих технологических операций и необходимости дополни-

тельного разогрева расплава, что в конечном итоге позволит уменьшить энергетические затраты на внепечную обработку.

#### **Анализ публикаций по теме исследования**

Методика расчета распределения температур в футеровке ковша при термическом воздействии на нее расплава приведена во многих работах, в частности, в [1–2]. В статье [3] представлены результаты моделирования теплового состояния сталеразливочного ковша при переменной тепловой нагрузке, полученные методом конечных элементов в программном пакете ANSYS.

В результате анализа и обработки данных натуральных исследований предложена математическая модель [4] для прогноза изменения температуры расплава при подготовке к вакуумированию ковшей в зависимости от массы и начальной температуры налитой в них стали, а также от температуры футеровки ковшей перед выпуском [5]. Модель учитывает измеренное теплосодержание ковша и температуру стали на выпуске. Результатом расчета является изменение температуры металла в процессе внепечной обработки.

С использованием этой модели разработана система мониторинга теплосодержания сталеразливочного ковша, подаваемого под выпуск [6]. При этом прогноз изменения температуры стали в ковше осуществляется на основании фактических и расчетных данных и используется для оперативной корректировки температурного режима производства стали. Определение теплосодержания ковша, подаваемого под плавку, позволяет оценить динамику снижения температуры расплава в процессе дальнейшей его обработки, определить технологическую цепочку до выпуска стали и начала внепечной обработки, упростить процедуру принятия решения о выборе ковша под выпуск, исключить необоснованные операции нагрева и охлаждения стали, повысить качество заготовки благодаря стабилизации температуры металла в ковше перед разливкой.

Однако до настоящего времени не рассматривалась динамика параметров теплового состояния футеровки сталеразливочного ковша при выпуске в него расплава.

#### **Формулировка цели статьи**

Исследовать изменение температурного поля футеровки сталеразливочного ковша при постепенном заполнении его жидкой сталью.

## Основная часть

Для этой цели использован метод конечных элементов, который позволяет решать широкий круг задач механики, теплообмена, электро- и магнитостатики, а также является основой инженерного анализа. Программный пакет ELCUT предназначен для проведения инженерного анализа и двумерного моделирования методом конечных элементов. Он позволяет решать краевые задачи, описываемые эллиптическими дифференциальными уравнениями в частных производных относительно скалярной или векторной функции.

Как правило, интерес представляет распределение температуры, температурного градиента и теплового потока. ELCUT позволяет выполнять линейный и нелинейный анализ температурных полей в плоской и осесимметрической постановке.

Физическая модель включает в себя уравнения в частных производных, граничные условия, с которыми решаются эти уравнения, и свойства материала. В контексте задачи теплопроводности ELCUT использует уравнения для плоскопараллельной задачи

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) = -q(T) - c(T) \rho \frac{\partial T}{\partial t};$$

или осесимметричной задачи

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda(T) r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -q(T) - c(T) \rho \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

где  $T$  – температура;  $\lambda(T)$  – теплопроводность;  $q(T)$  – мощность внутренних источников тепла;  $c(T)$  – удельная теплоемкость;  $\rho$  – плотность материала.

Уравнения (1) решаются совместно с граничными условиями, которые в ELCUT соответствуют стандартным. Это условие Дирихле – температура на поверхности материала, которая может быть задана как числом, так и формулой, описывающей зависимость температуры от координат и от времени, если задача нестационарная. Второе граничное условие – это известная плотность теплового потока. Если она нулевая, то это естественное граничное условие, а если ненулевая, то она может быть задана как числом, так и функцией от координат или времени. Конвективный теплообмен на границе описывается двумя константами: коэффициентом теплообмена и температурой окружаю-

щей среды. Радиационный теплообмен описывается также температурой среды и коэффициентом лучистого теплообмена.

В качестве объекта исследования был выбран сталеразливочный ковш с размерами рабочего пространства: диаметр 3,0 м и высота 3,7 м. Моделирование нестационарной теплоотдачи через многослойные стенку и днище производилось по исходным данным и начальному полю температур слоев футеровки с учетом реальной динамики температуры расплава.

Стенки и днище ковша состоят из нескольких слоев различных материалов. Стенки – из хромомagneзитового кирпича (корунд) толщиной 150 мм, муллитового кирпича толщиной 65 мм, шамотного кирпича толщиной 32 мм и стального кожуха толщиной 20 мм. Днище – из корунда толщиной 150 мм, выравнивающего слоя из муллитового кирпича, толщина которого 65 мм, алюмосиликатного самотвердеющего бетона (АССБ), средняя толщина которого составляет 85 мм и кожуха толщиной 28 мм. Структура футеровки ковша, а также теплофизические свойства ее материалов взяты из [7].

Поскольку налив ковша продолжается 15 минут, основные изменения температурного поля происходят в первом слое – корунде. Поэтому, с целью упрощения геометрии модели, вместо остальных слоев футеровки стенки и днища принят один, комбинированный слой с приведенными значениями свойств его компонентов (рис. 1).

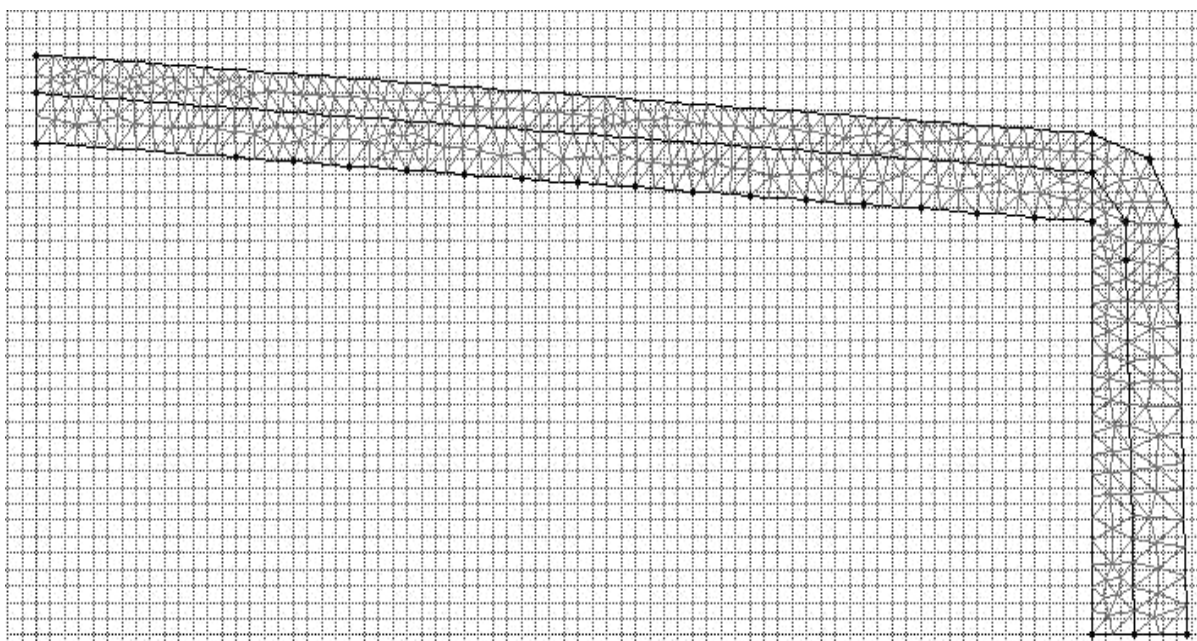


Рисунок 1 – Геометрическая модель ковша

Толщина первого слоя как в стенке, так и в днище равна 150 мм, плотность корунда принята равной 3000 кг/м<sup>3</sup>. Теплопроводность  $\lambda_1$  и теплоемкость  $C_1$  корунда в модели заданы формулами

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= 2,10 + 1,90 \cdot 10^{-3} t, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C}); \\ C_1 &= 790 + 0,42 t, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}).\end{aligned}\quad (2)$$

Для второго слоя рассчитаны приведенные значения теплоемкости, теплопроводности и плотности по свойствам муллита, шамота и стали кожуха [7]. При этом толщина второго слоя футеровки стенки принята равной сумме толщин муллита, шамота и стального кожуха –  $\delta_2^{cm} = 117$  мм.

Приведенное значение теплопроводности второго (комбинированного) слоя футеровки стенки ковша получим из условия сохранения величины термического сопротивления этих слоев [8]

$$\lambda_2 = \delta_2 / \sum \delta_i / \lambda_i, \quad (3)$$

где  $i = 2, 3, 4$  (номер соответствующего материала).

Приведенное значение теплоемкости и плотности второго слоя футеровки находим по выражениям

$$\begin{aligned}C_2 &= \sum C_i \rho_i \delta_i / \delta_2^{cm}, \\ \rho_2 &= \sum \rho_i \delta_i / \delta_2^{cm}.\end{aligned}\quad (4)$$

Для днища приведенные значения указанных характеристик рассчитаны аналогично по свойствам муллита, АССБ и стали кожуха согласно данным [7]. При этом толщина второго слоя футеровки днища принята равной –  $\delta_2^{dn} = 178$  мм.

Начальным условием для выпуска стали в ковш является определенная температура разогрева внутренней поверхности футеровки ковша. Программа ELCUT не позволяет вводить ненулевые начальные условия, однако дает возможность решать связанные задачи, используя результаты решения предыдущей задачи в качестве исходных данных для последующей задачи. Поэтому для моделирования изменения теплового состояния ковша при его наливке последовательно решались две связанные задачи.

Задача 1 – Предварительный разогрев ковша на стенде в течение 24 часов. При этом на внутренней поверхности стенки и днища

ковша реализуется граничное условие I-го рода – постоянная температура  $1000^{\circ}\text{C}$ . От наружной поверхности ковша (стального кожуха) в окружающую среду с постоянной температурой  $30^{\circ}\text{C}$  тепло отводится за счет конвекции. В соответствии с предварительным расчетом и литературными данными значение коэффициента теплоотдачи принято равным  $25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ .

Задача 2 – Выпуск стали в ковш в течение 15 минут.

Этот процесс моделируется наливом расплава 15-ю дискретными порциями высотой по  $0,2 \text{ м}$ , последовательно каждую минуту заполняющими ковш до высоты  $3,0 \text{ м}$ . Соответственно, внутреннее ребро геометрической модели ковша разбито на 16 участков (дополнительный участок протяженностью  $0,7 \text{ м}$  соответствует запасу высоты ковша), которым присвоены метки ребер от 1 до 16.

Граничное условие для каждого участка – скачкообразное изменение температуры внутренней стенки ковша от  $1000^{\circ}\text{C}$  до  $1600^{\circ}\text{C}$  (начальная температура расплава) в соответствующий момент времени. Для первого слоя футеровки стенки (участок 1 внутреннего ребра) и днища эта температура задается сразу –  $T_1(0) = 1600^{\circ}\text{C}$ .

Следующий слой расплава, которому соответствует участок 2, будет заполнен через одну минуту. Задать граничные условия для этого участка позволяет встроенная ступенчатая функция STEP, равная 0 при отрицательном значении аргумента и 1 – при неотрицательном его значении. Поэтому граничное условие для температуры расплава на участке 2 выглядит следующим образом:

$$T_2(t) = 1000 + 600 \cdot \text{step}(t - 60), \quad (5)$$

где  $t$  – текущее время моделирования в секундах.

На всех последующих участках, до 15-го включительно, используется аналогичное выражение для задания граничных условий:

$$T_j(t) = 1000 + 600 \cdot \text{step}(t - 60 \cdot (j - 1)), \quad (6)$$

где  $j$  – номер участка.

При этом коэффициент теплопередачи от расплава к стенкам ковша на всех участках 1...15 равен  $\alpha_p = 5800 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ .

По окончании налива ковша над расплавом остается запас высоты ковша, который в нашем случае составляет  $0,7 \text{ м}$  (участок 16 внутреннего ребра). Здесь ковш расплавом не заполняется, однако внутренняя поверхность футеровки подвергается воздействию лучистого потока, исходящего от струи жидкой стали и с поверхности

расплава. В качестве граничного условия для всей поверхности внутреннего ребра 16 расчетным путем определен усредненный тепловой поток мощностью 210 кВт.

На рисунке 2 представлено полученное в результате решения задачи 2 в пакете ELCUT температурное поле футеровки ковша по окончании выпуска в него расплава. В ходе моделирования днище и примыкающий к нему 1-й участок стенки контактируют с расплавом сразу, 5-й участок, находящийся на высоте ~1 м, заполняется через 5 минут, 10-й участок (~2 м) – через 10 минут, а 15-й (~3 м) – на последней минуте налива.

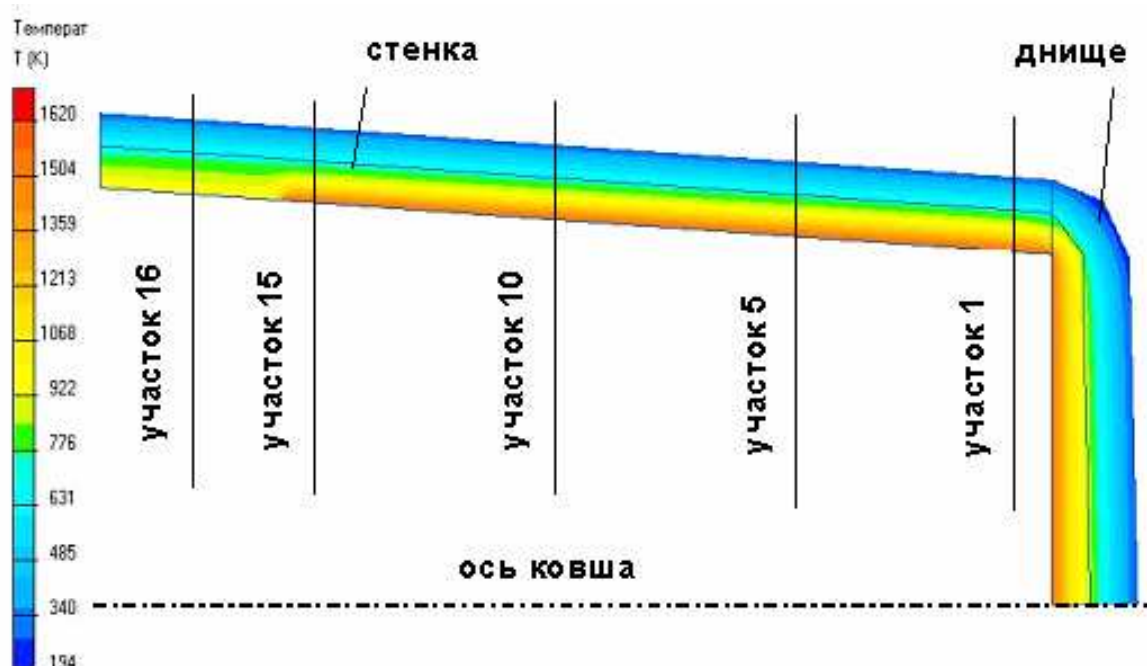


Рисунок 2 – Температурное поле футеровки ковша по окончании выпуска в него расплава

Соответствующее распределение температуры по толщине футеровки приведено на рис. 3. Очевидно, что практически все изменение теплосодержания футеровки ковша в ходе его заполнения жидкой сталью локализуется в первом слое корунда толщиной 150 мм. Несмотря на отсутствие непосредственного контакта с жидкой сталью, температура внутренней стенки футеровки на 16-м участке стенки достигает 1140°C.

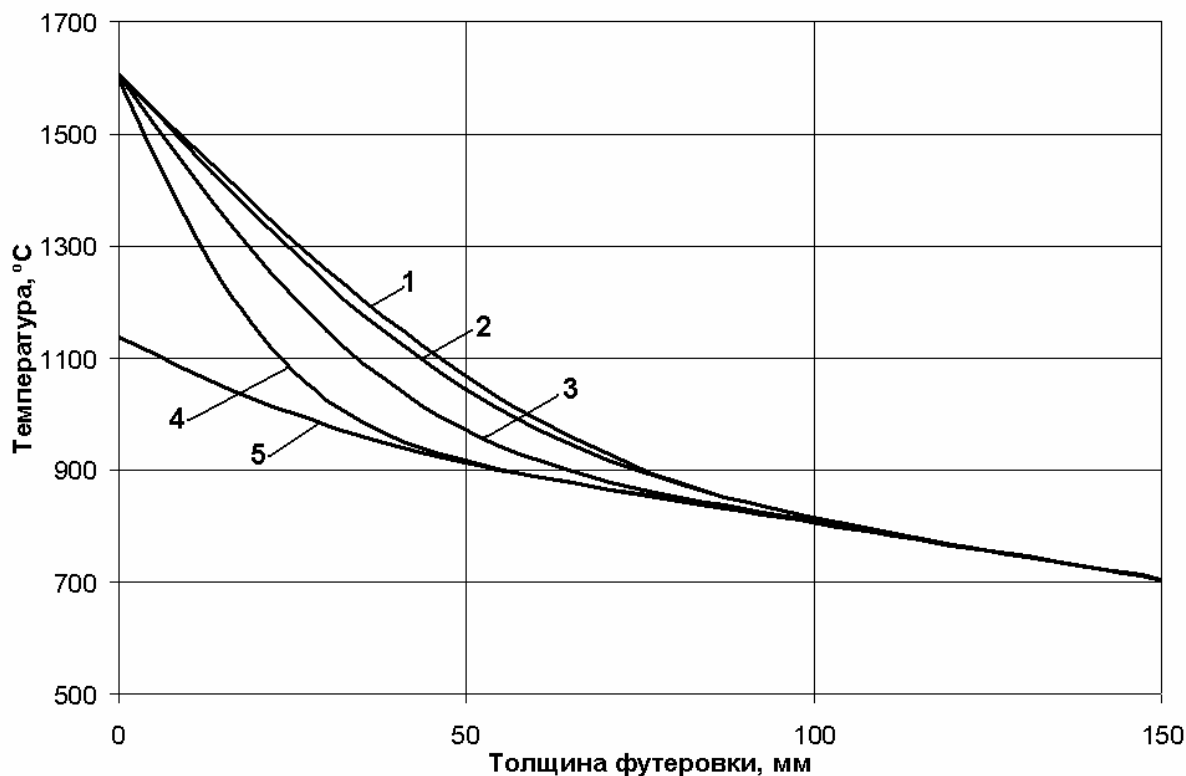


Рисунок 3 – Распределение температуры в слоях футеровки:

1 – участок 1; 2 – участок 5; 3 – участок 10;

4 – участок 15; 5 – участок 16

#### Выводы и перспективы дальнейших исследований

Исследована динамика параметров теплового состояния сталеразливочного ковша при выпуске в него расплава. Изменение температурного поля футеровки при постепенном заполнении ковша жидкой сталью получено в результате решения методом конечных элементов краевой задачи, описываемой эллиптическими дифференциальными уравнениями в частных производных, в программном пакете ELCUT.

Установлено, что практически все изменение теплосодержания футеровки ковша в ходе его заполнения жидкой сталью локализуется в первом слое корунда.

Полученные результаты могут быть использованы для создания системы прогнозирования температуры расплава и теплового состояния сталеразливочных ковшей в ходе внепечной обработки стали.



ЛИТЕРАТУРА

1. Volkova O. Modelling of temperature distribution in refractory ladle lining for steelmaking / O. Volkova, D. Janke // *ISIJ International*, 2003. v.43. No.8. P.1185–1190.
2. Казачков Е.А., Исайчикова С.Г. // В кн.: Вестник Приазовского государственного технического университета. – Мариуполь: ПГТУ, 2000. – N 9. – С.27– 33.
3. Ошовская Е. В. Моделирование работы футеровки сталеразливочного ковша с переменной тепловой нагрузкой // Е.В. Ошовская, И.Н. Салмаш, Д.А. Фоменко. – Наукові праці ДонНТУ: Металургія. – 2011. – Вип. 13 (194). – С. 198-210.
4. Бейцун С.В. Математическая модель процесса охлаждения расплава в сталеразливочном ковше // С.В. Бейцун, Н.В. Михайловский, В.Ф. Сапов. – Металургія: Збірник наукових праць. – Запоріжжя: ЗДІА, 2006. – Вип. 13. – С. 16-21.
5. Михайловский Н.В. Влияние толщины футеровки сталеразливочного ковша на тепловые потери расплава // Н.В. Михайловский, С.В. Бейцун. – Металлургическая теплотехника: сборник научных трудов НМетАУ. – Днепропетровск: НМетАУ, 2010. – С. 135-142.
6. Агеев С.В. Технология автоматического определения теплосодержания сталеразливочного ковша // С.В. Агеев, А.Д. Чернопольский, И.А. Петушков, В.И. Бойков, С.В. Быстров, А.А. Блишников. – Металлург. – 2011. – N 5. – С. 48–52.
7. Бейцун С.В. Тепловое состояние ковшей при внепечной обработке стали // С.В. Бейцун, Н.В. Михайловский, В.И. Шibaкинский. – Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – N 4. – С. 104–107.
8. Исаченко В.П. Теплопередача. Изд. 4-е / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел // М.: Энергия. – 1989. – 440 с.