

УДК 669.18**Е.В. Ошовская, И.Н. Салмаш, Д.А. Фоменко****МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ФУТЕРОВКИ
СТАЛЕРАЗЛИВОЧНОГО КОВША С ПЕРЕМЕННОЙ
ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКОЙ**

В статье представлены результаты исследования теплового состояния сталеразливочного ковша, который эксплуатируется с переменной тепловой нагрузкой, обусловленной наполнением разными порциями жидкой стали, объем которых отличается от номинальной вместимости ковша, и выполнением различных технологических операций. Исследования выполнены путём математического моделирования в прикладном пакете ANSYS.

Ключевые слова: сталеразливочный ковш, футеровка, температура, математическое моделирование, исследования, днище ковша, огнеупорные материалы, стойкость, напряжения.

Введение

Эффективное функционирование сталеразливочного ковша в значительной мере обусловлено стойкостью его футеровки. Основными причинами, вызывающими необходимость ремонта футеровки, являются износ и разрушение. Появление и развитие трещин в огнеупорах вызвано термическими нагрузками, возникающими в процессе эксплуатации ковша. На современном этапе производства стали разливочный ковш используется не только как ёмкость для приёма, хранения и передачи жидкой стали, но и как агрегат, в котором выполняются различные технологические операции – нагрев, перемешивание, вакуумирование и др. Такие условия эксплуатации ковша неотъемлемо сказываются на тепловом состоянии и стойкости футеровки.

Анализ публикаций по теме исследования

Многие зарубежные и отечественные исследователи [1–4] занимаются изучением термического и прочностного состояния футеровки ковшей. Эти работы связаны с изучением влияния разных схем футеровки, различных применяемых огнеупорных материалов, параметров разных режимов функционирования (температура нагрева, длительность операции и пр.) на стойкость футеровки, но относились к ковшам, которые эксплуатируются с объёмами жидкой стали, соответствующими номинальной вместимости. Для сталеразливочных ковшей, которые используются для выполнения технологических операций с разными объёмами плавов, находящимися в них в различные моменты времени, такие исследования отсутствуют. Поэтому задача изучения факторов, влияющих на стойкость футеровки таких ковшей, остаётся актуальной.

Известно [5], что разрушение футеровки сталеразливочного ковша вызвано воздействием термической нагрузки и ее перепадами. Под дей-

ствием температуры происходит расширение огнеупоров, но этот процесс ограничен жёстким кожухом ковша, что вызывает сжатие отдельных слоев огнеупоров. При напряжениях, превышающих предел прочности огнеупорного материала, происходит возникновение трещин, дальнейшее температурное воздействие вызывает их развитие вплоть до разрушения огнеупоров футеровки. Напряжения, возникающие в футеровке ковша, описываются зависимостью:

$$\sigma = \alpha \cdot \Delta T \cdot E, \quad (1)$$

где α – коэффициент линейного расширения огнеупорного материала; ΔT – разница температур в слоях футеровки; E – модуль упругости огнеупорного материала.

Т.е. для огнеупоров определённого типа уровень возникающих напряжений определяется перепадом температур, а футеровка сталеразливочных ковшей, эксплуатирующихся с разными порциями жидкой стали, испытывает температурные перепады, вызываемые переменной тепловой нагрузкой как по времени действия, так и по площади воздействия (различный уровень заполнения жидкой сталью, перемещение зоны шлакового пояса), что обуславливает особенности её термомеханического состояния.

В данной статье представлены результаты исследований теплового состояния футеровки сталеразливочного ковша с номинальной вместимостью 90 т, который эксплуатируется с разными порциями жидкой стали, размер которых обусловлен объёмом текущей плавки, для выполнения различных технологических операций. Исследования были направлены на изучение температурных полей, возникающих в футеровке и кожухе ковша, и выполнялись с помощью математического моделирования в прикладном пакете ANSYS.

Принципиальная конструктивная схема футеровки ковша показана на рисунке 1.

Футеровка ковша выполнена из разных огнеупорных материалов: наливных и фасонных. В таблице 1 приведены состав и теплофизические характеристики используемых огнеупорных материалов и стального кожуха.

Рисунок 1 – Схема футеровки сталеразливочного ковша.

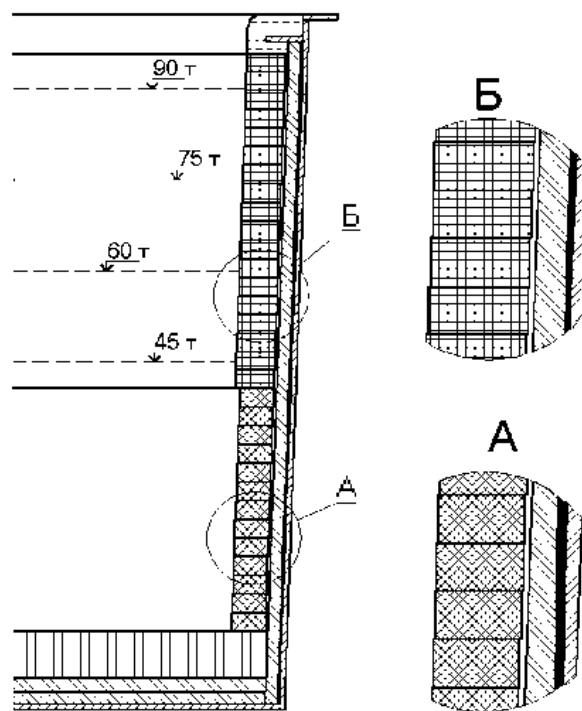
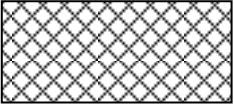
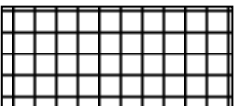
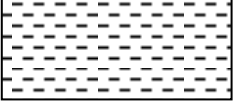
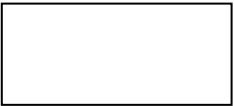
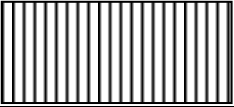


Таблица 1 – Теплофизические характеристики огнеупорных материалов и стального кожуха

Обозначение	Основной состав	Плотность, кг/м ³	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Теплоемкость, Дж/(кг·К)
1. RESISTAL B80 	Al ₂ O ₃ – 80,5% SiO ₂ – 13 % Fe ₂ O ₃ – 1,4% TiO ₂ – 3,1 %	2750	500° – 1,8 750° – 1,8 1000° – 1,8	400° – 1112 800° – 1212 1000° – 1281 1600° – 1342
2. RADEX RCS10-5 	MgO – 96,5% CaO – 1,8% SiO ₂ – 0,8% Fe ₂ O ₃ – 0,7% Al ₂ O ₃ – 0,2%	2980	16	400° – 1140 800° – 1220 1000° – 1274 1600° – 1465
3. RADEX RCS10-7 	MgO – 97% CaO – 1,6% SiO ₂ – 0,6% Fe ₂ O ₃ – 0,5% Al ₂ O ₃ – 0,2%	3030	12	400° – 1150 800° – 1230 1000° – 1290 1200° – 1480
4. PERMASIT GS 	MgO – 95% CaO – 2,1% SiO ₂ – 1% Fe ₂ O ₃ – 0,2% Al ₂ O ₃ – 0,1%	2200	400° – 2,0 600° – 1,8 1000° – 1,6	20° – 920 500° – 1080 1000° – 1080
5. PERFILL SL 	MgO – 77,4% CaO – 15% SiO ₂ – 2,2% Fe ₂ O ₃ – 5% Al ₂ O ₃ – 0,4%	1900	9,2	400° – 1189 800° – 1265 1000° – 1316 1200° – 1361
6. ANKOCAST VL92MAS 0-15 	Al ₂ O ₃ – 92% SiO ₂ – 0,2% Fe ₂ O ₃ – 0,2% MgO – 0,7%	110° – 2990 1000° – 2940	400° – 3,3 800° – 2,6 1200° – 2,08	400° – 1132 800° – 1228 1000° – 1293 1200° – 1349
7. PYROSTOP CARTO 125 	Al ₂ O ₃ – ≤3% SiO ₂ – 34 % CaO+MgO – 10%	480	400° – 0,08 600° – 0,1 800° – 0,15 1000° – 0,21	400° – 1100 800° – 1213 1200° – 1300
8. Кожух стальной 		20° – 7800 100° – 7790 200° – 7780 300° – 7750 400° – 7730 500° – 7700	50° – 51,5 200° – 48 400° – 42 1000° – 32,5	100° – 480 200° – 495 400° – 530

В процессе моделирования рассматривался следующий цикл работы ковша:

Этап №0. Пустой ковш после прогрева футеровки.

Этап №1. Наполнение первой порции жидкой стали и выдержка её в течение 60 мин.

Этап №2. Добавление второй порции стали и выдержка, полученного объёма, в течение 10 мин.

Этап №3. Подогрев жидкого металла в течение 40 мин.

Этап №4. Выдержка металла в течение 8 ч.

Этап №5. Вакуумирование жидкой стали в течение 20 мин.

Для каждого этапа была разработана компьютерная модель, учитывающая особенности теплопередачи от жидкой стали к футеровке ковша для рассматриваемой технологической операции. Результатами моделирования выступали поля температур в футеровке ковша (рис. 2).

Предварительный этап моделирования (этап №0) был связан с изучением теплового состояния футеровки после прогрева ковша на стенде подготовки. При этом было принято, что температура на внешней поверхности футеровки равна 800–850°C. На основании измерений температуры наружной поверхности кожуха выполнили оценку коэффициента теплоотдачи к окружающей среде. При моделировании на поверхности стального кожуха задано усреднённое значение коэффициента теплоотдачи равное 12,3 Вт/(м²·К) при температуре окружающего воздуха 30°C (граничное условие III рода). Задача рассматривалась как стационарная.

На рис.3 представлены полученные картины распределения температуры в футеровке ковша, на рис.4 изменение температуры в характерных сечениях.

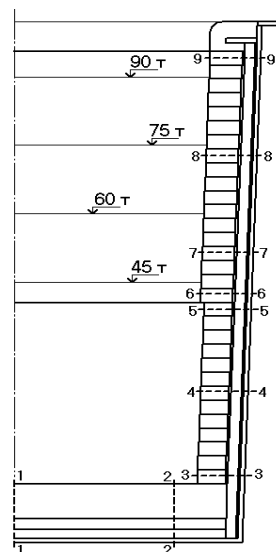


Рисунок 2 – Схема расположения характерных сечений футеровки ковша.

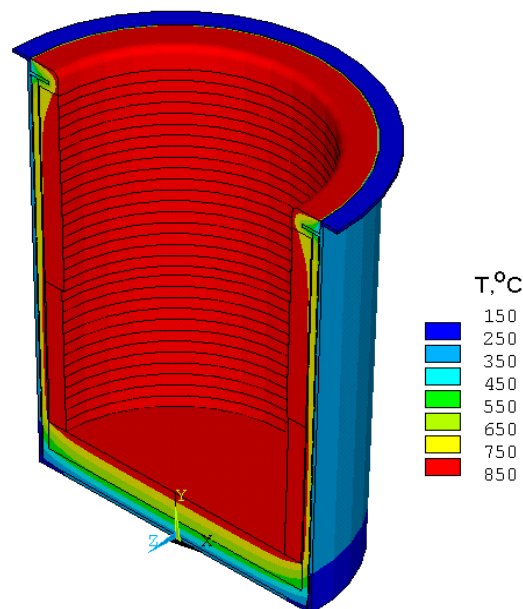
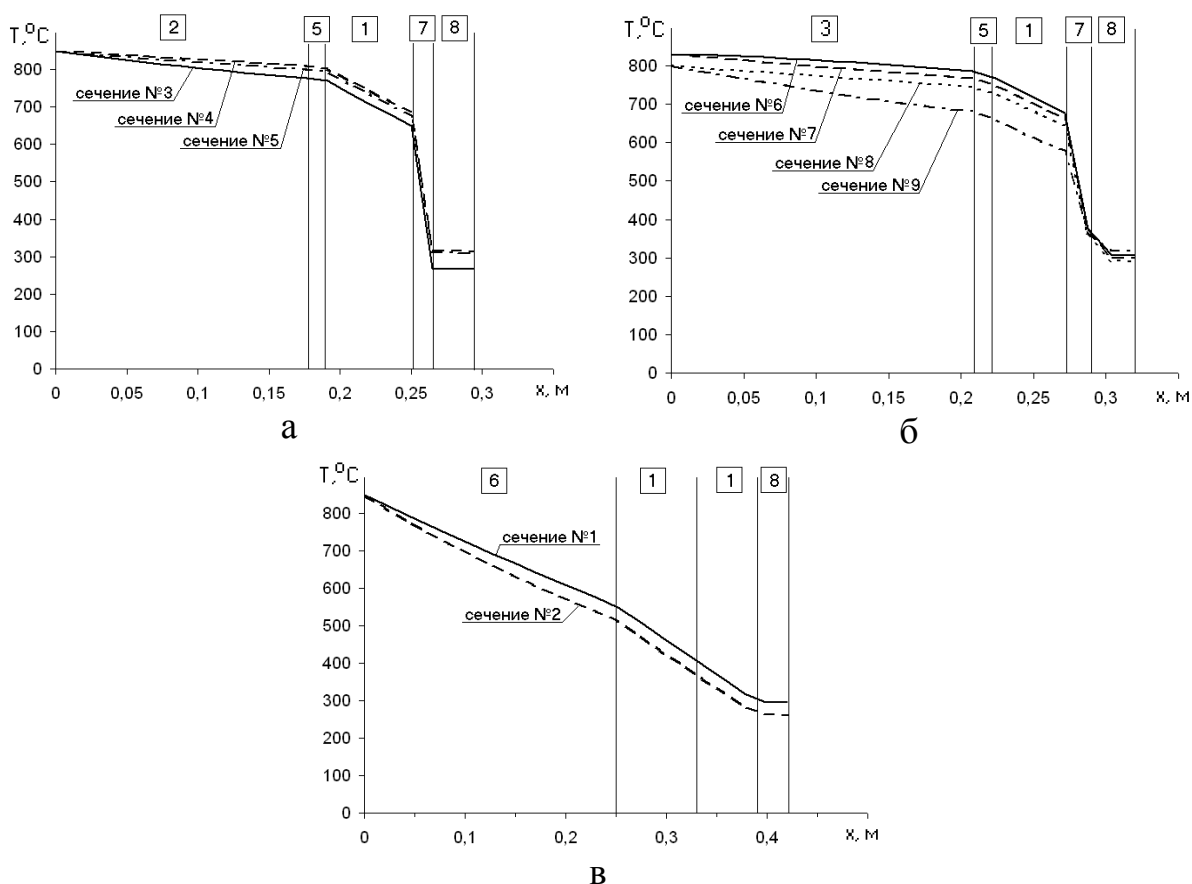


Рисунок 3 – Распределение температуры в футеровке после прогрева ковша.

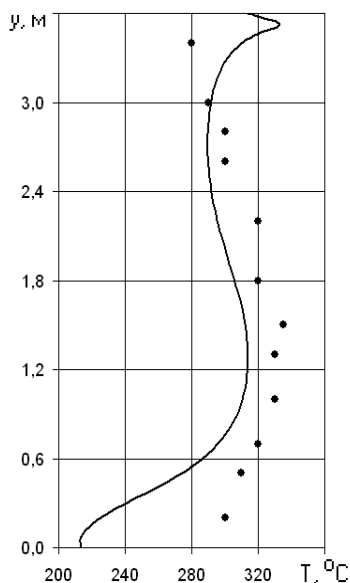


а) сечения № 3–5; б) сечения № 6–9; в) сечения № 1–2

Рисунок 4 – Изменение температуры по толщине футеровки и кожуха ковша в различных сечениях, расположение сечений показано на рис. 2.

Можно отметить, что по высоте ковша рабочий слой футеровки имеет практически однородную температуру. Температура стенок нижней части ковша более высокая (на $30\text{--}50^\circ\text{C}$), чем средней и нижней. Днище ковша также прогрето равномерно, но температурный градиент в первом огнеупорном слое выше в 2 раза, чем для стен. Основное падение температуры происходит в изоляционном слое футеровки.

На рис. 5 приведено изменение температуры на наружной поверхности кожуха ковша. Средняя температура стального кожуха составляет $290\text{--}320^\circ\text{C}$. Сравнение расчётных значений температуры с измеренными в характерных точках на ковше после его поступления со стенда подогрева показало достаточную сходимость. Средняя погрешность составила $7,3\%$. Расхождение значений вызвано допущениями математической модели. Полученное распределение температуры свидетельствует о том, что после подогрева ковша в его футеровке отсутствуют значительные градиенты температуры, как в радиальном, так и осевом (вертикальном) направлении. Т.е. температурная деформация огнеупоров не приведёт к образованию трещин.



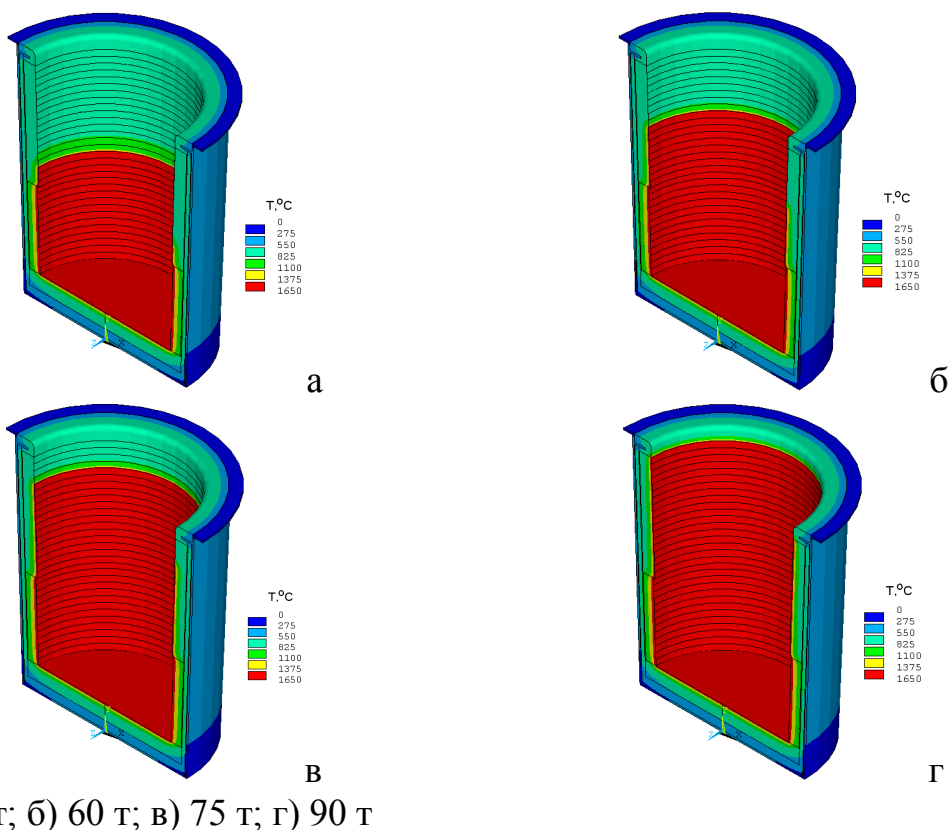
линия – расчётные значения,
точки – измеренные значения

Рисунок 5 – Изменение температуры наружной поверхности стального кожуха ковша после его прогрева.

мент времени 60 мин. при различной массе первой порции жидкой стали.

Следующий этап моделирования (этап №1) соответствовал случаю выдержки ковша, наполненного первой порцией жидкой стали, в течение 60 мин. При этом температура на внешней поверхности футеровки, контактирующей с жидкой сталью принята равной 1600°C , а со шлаком – 1620°C . На наружной поверхности стального кожуха задавалось условие, соответствующее естественной теплоотдачи к окружающему воздуху. Задача рассматривалась нестационарная, с шагом по времени 600 с.

На рисунке 6 приведены картины распределения температуры в футеровке ковша на момент



а) 45 т; б) 60 т; в) 75 т; г) 90 т

Рисунок 6 – Картины распределения температуры в футеровке ковша при разной массе первой порции жидкой стали.

Можно отметить, что распределение температуры для всех рассмотренных случаев имеет подобный характер. Это подтверждается и графиками изменения температуры в характерных сечениях футеровки (рис.7).

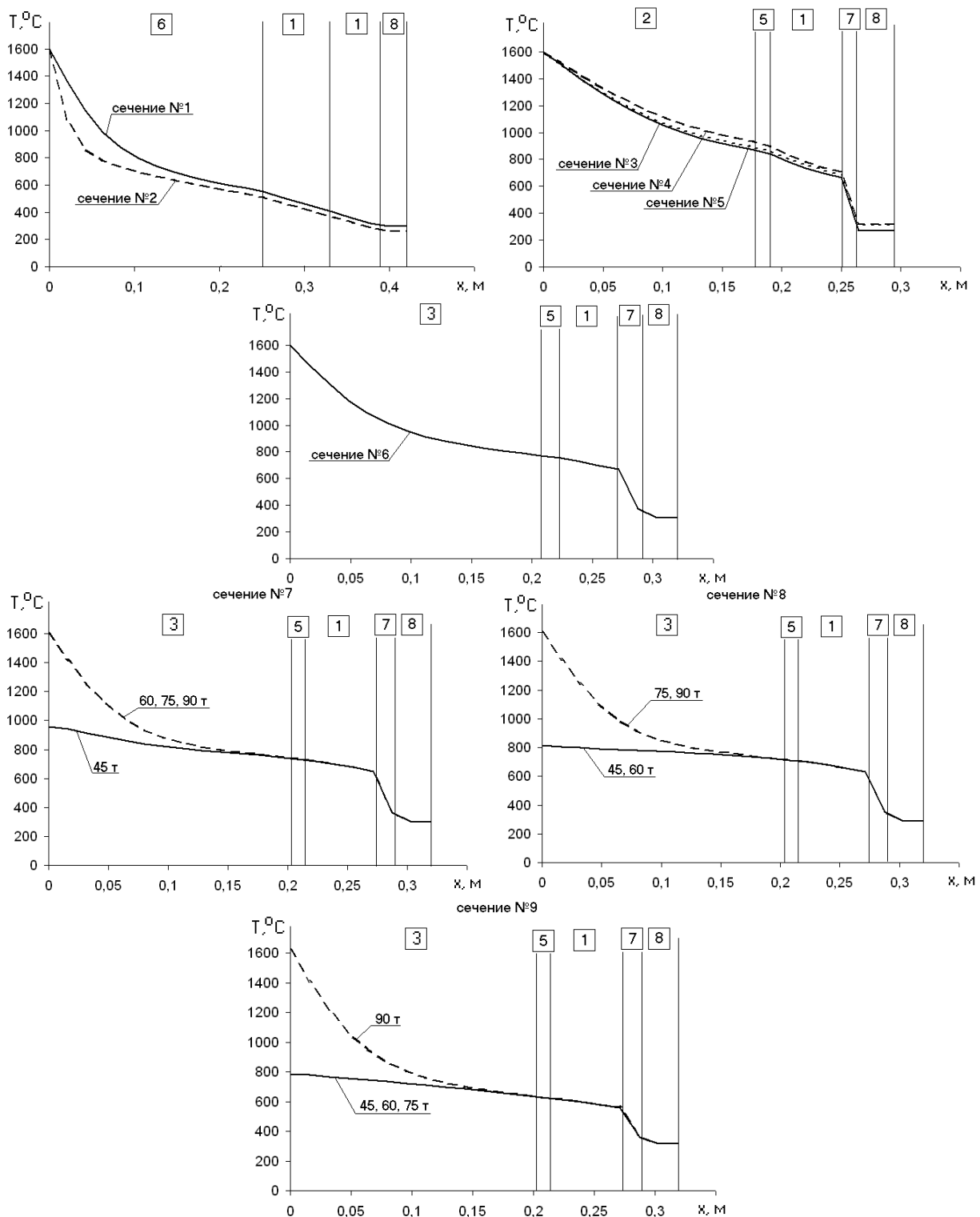


Рисунок 7 – Графики изменения температуры в характерных сечениях футеровки при разных порциях жидкой стали.

Стены ковша в нижней и средней части прогреты одинаково для любой порции металла. В верхней части имеются отличия, связанные с разной площадью контакта металла и стен ковша. В целом, в отличие от картин, наблюдаемых после этапа подготовки ковша, в данном случае отмечается перепад температуры в первом слое футеровки стен и днища (почти в 2 раза), что соответствует значительному градиенту температуры в радиальном направлении, который может привести к возникновению и развитию трещин в этом направлении. Также при заполнении ковша порциями меньшими номинальной вместимости возникает значительный температурный градиент в вертикальном направлении в первом слое футеровки стен для верхней и средней части – на глубине 0,4..0,5 от толщины слоя наблюдается перепад температуры в 1,5..2 раза. Это может вызывать появление и развитие вертикальных трещин в рабочем слое футеровки. Для всех случаев заполнения металлом температура кожуха ковша остаётся в диапазоне 270...320°C.

На следующем этапе (этап №2) исследовали влияние на тепловое состояние футеровки ковша добавки второй порции жидкой стали с последующей выдержкой полученного объема в течении 10 мин. В виду разных объемов плавок рассмотрено несколько вариантов сочетаний порций металла в ковше с учетом его номинальной вместимости (таблица 2).

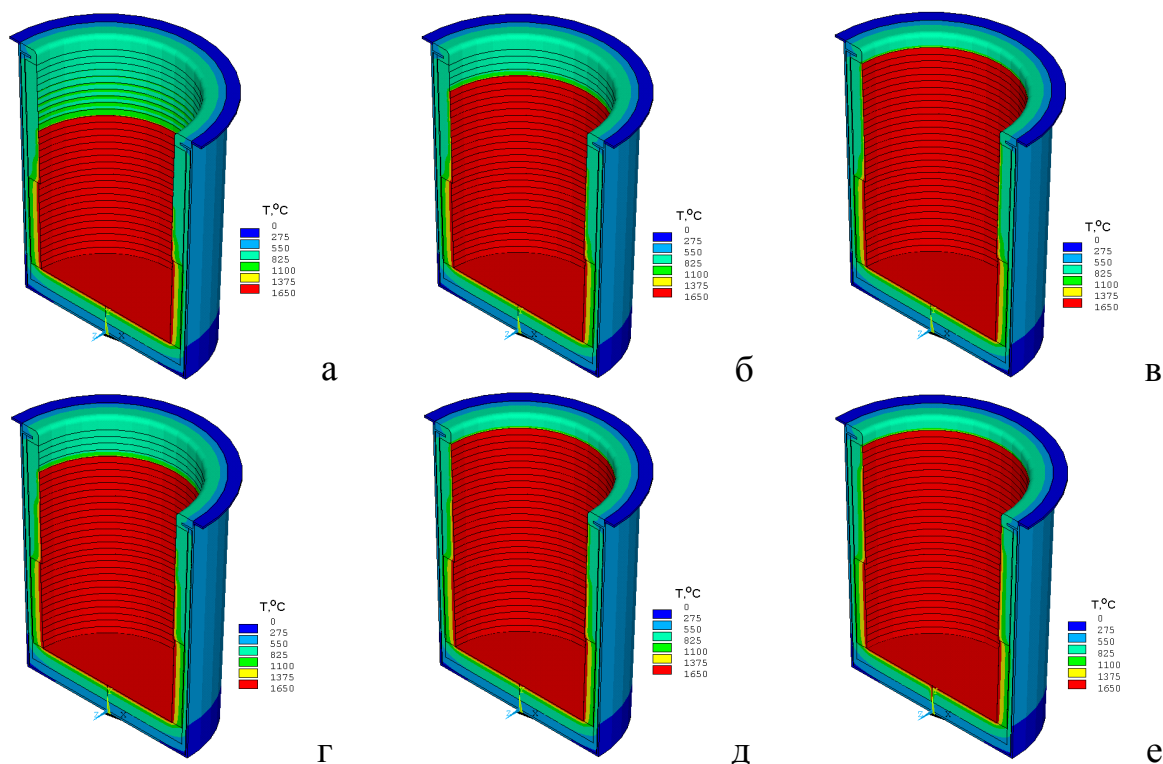
Таблица 2 - Сочетание порций жидкого металла

Размер первой порции, т	Размер второй порции, т		
45	12	28	43
60	12	28	—
75	12	—	—
90	—	—	—

Указанные сочетания соответствовали следующим вариантам расчётных схем: №1 – 45 + 12 т; №2 – 45 + 28 т; №3 – 45 + 43 т; №4 – 60 + 12 т; №5 – 60 + 28 т; № 6 – 75 + 12 т. Начальная температура новой порции жидкой стали принята равной 1600°C, а шлака – 1620°C. На наружной поверхности кожуха осуществляется теплоотдача в окружающую среду. Задача – нестационарная, шаг по времени 120 с.

На рис. 8 приведены картины распределения температуры для всех расчётных схем на момент времени 10 мин. Нужно отметить, что характер распределения температуры одинаков. Сравнение численных результатов позволило выявить, что различия касаются футеровки средней части ковша – сечение 7 (рис. 9). В этом месте в первом слое футеровки на глубине до 50% от толщины огнеупора наблюдается разный перепад температуры.

Для случаев, когда первая порция жидкой стали равнялась 45 т, температура в первом слое на 50..220 °C ниже, чем для порций 60 и 75 т.



а) 45+12 т; б) 45+28 т; в) 45+43 т; г) 60+12 т; д) 60+28 т; е) 75+12 т

Рисунок 8 – Картины распределения температуры в футеровке ковша на момент времени 10 мин. при выдержке двух порций стали следующего размера.

Однако, в первом случае градиент температуры внутри огнеупора на 15..20 % выше. Т.е. можно предположить, что при наполнении ковша первой порцией малого объема такой перепад температуры будет в большей мере способствовать образованию трещин в футеровке, не смотря на более низкие абсолютные температуры.

Температура нагрева кожуха ковша для всех случаев находилась в диапазоне 260... 310 °С.

На этапе №3 моделирования рассмотрен подогрев жидкой стали в ковше до температуры 1600 °С в течение 40 мин. При этом в математической модели в качестве нагрузки на внешней поверхности футеровки задавался тепловой поток. Величина теплового потока была представлена как функция времени τ в зависимости от зоны ковша:

– днище

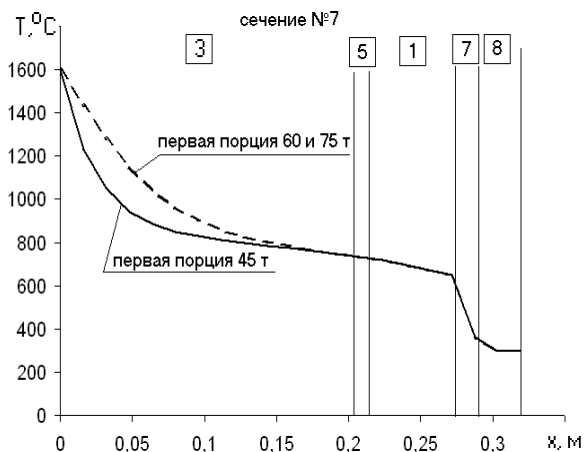


Рисунок 9 – Изменение температуры в сечении №7 для разных сочетаний порций жидкой стали в ковше через 10 мин. выдержки

$$f_x = 22997 + 42,6 \cdot \tau^{0,5}; \quad (2)$$

– рабочая футеровка

$$f_x = 25095 + 26,5 \cdot \tau^{0,5}; \quad (3)$$

– подшлаковая зона

$$f_x = 30866 + 50 \cdot \tau^{0,5}; \quad (4)$$

– шлаковая зона

$$f_x = 48257 + 10,1 \cdot \tau^{0,5}. \quad (5)$$

На наружной поверхности кожуха задавались условия теплоотдачи в окружающую среду. Задача – нестационарная, шаг по времени 300 с.

В результате моделирования установлено, что характер распределения температуры в футеровке для разных расчётных схем, соответствующих различным комбинациям порций металла в ковше, аналогичен полученному на этапе №2. Однако значения температур внутри первого слоя возрастают на 20...200°C. Отмеченная ранее тенденция отличия теплового состояния футеровки средней части ковша (сечение 7) для расчётных схем с первой порцией металла 45 т сохраняется, но разница температур по толщине первого слоя уменьшается до 30..90°C, и градиент температуры по толщине снижается (рис.10), т.е. наблюдается более однородный прогрев огнеупора, что должно сказаться на замедлении распространения в нем трещин. Температура кожуха практически не изменилась, достигнув в нижней части ковша 330°C.

Дальнейшее изучение было связано с моделированием теплового поведения футеровки в процессе выдержки стали в ковше (этап №4). Длительность выдержки принята равной 8 ч. С учётом снижения температуры металла в качестве граничного условия на внешней поверхности стен и днища ковша задавался тепловой поток, описываемый зависимостями:

– днище

$$f_x = 2330 \cdot e^{-2,5 \cdot 10^{-4} \cdot \tau} + 3870; \quad (6)$$

– рабочая футеровка

$$f_x = 2190 \cdot e^{-3,1 \cdot 10^{-4} \cdot \tau} + 3990; \quad (7)$$

– подшлаковая зона

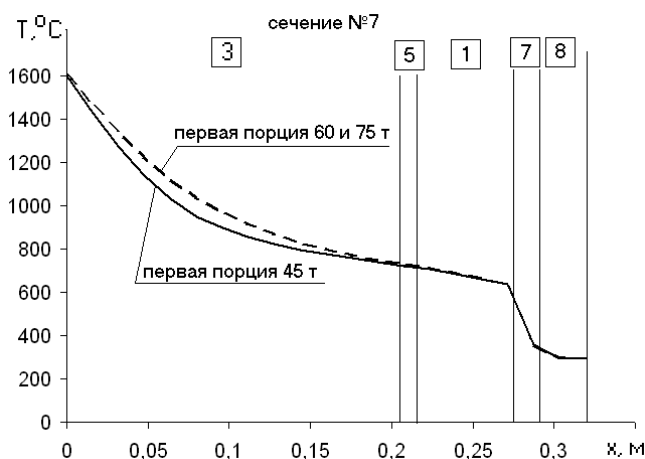


Рисунок 10 – Изменение температуры в сечении №7 для разных сочетаний порций жидкой стали в ковше на момент окончания подогрева

$$f_x = 2585 \cdot e^{-2,9 \cdot 10^{-4} \cdot \tau} + 4070; \quad (8)$$

— шлаковая зона

$$f_x = 690 \cdot e^{-2,4 \cdot 10^{-4} \cdot \tau} + 2370. \quad (9)$$

Картины распределения температуры в футеровке ковша для разных расчётных случаев в конце процесса выдержки металла показаны на рисунке 11.

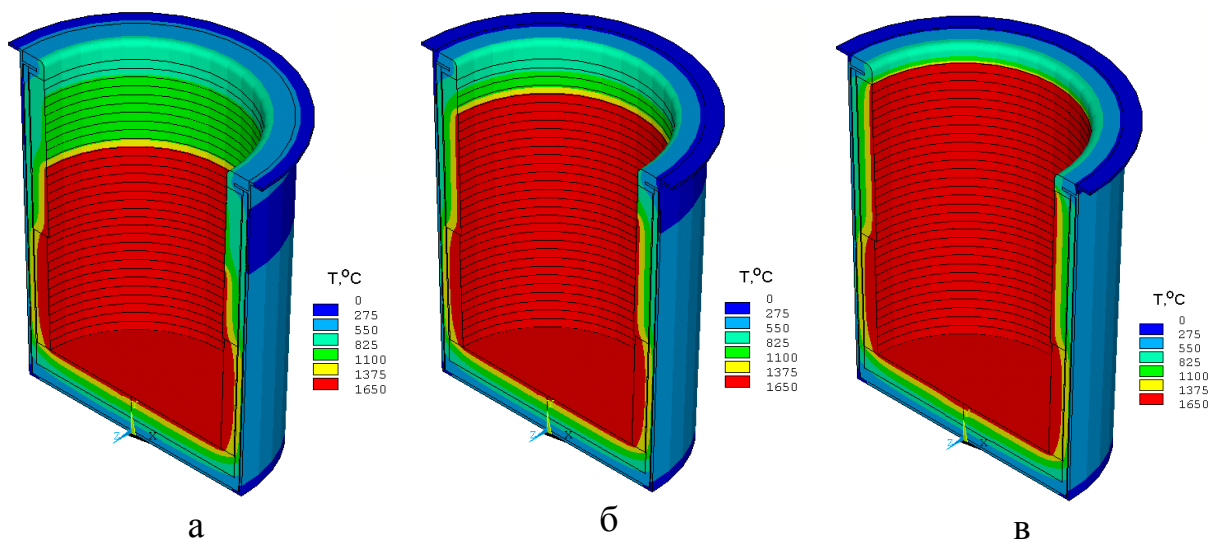


Рисунок 11 – Распределение температуры в футеровке ковша после 8 ч выдержки двух порций стали следующего размера: а) 45+12 т; б) 60+12 т; в) 75+12 т.

Можно отметить, что за время выдержки стали в нижней части ковша произошёл разогрев первого слоя футеровки по всей толщине огнеупора. Перепад температуры в этом слое составляет 250...300°C, что в 2 раза ниже, чем после этапов № 2 и 3, т.е. температурное поле стало более однородным. В средней и верхней части ковша температура футеровки возросла в 1,2...1,3 раза по сравнению с этапом №3, причём различия в уровне температур в сечении 7 практически отсутствуют для всех случаев заполнения ковша. Разница температур составляет 2...15°C при сравнении вариантов наполнения с первой порцией металла 45 и 75 т. Причём более высокие отклонения наблюдаются в третьем и втором слоях футеровки. Температура стального кожуха увеличивается, достигая диапазона 300...440°C, более высокие значения отмечаются в нижней части ковша. Т.е. можно сделать вывод, что за длительный период (8 ч) в футеровке ковша для всех вариантов заполнения происходит аккумулялирование тепла, приводящее к выравниванию температур, как в радиальном, так и вертикальном направлении, что должно сказаться на замедлении развития трещин, образовавшихся в первом слое футеровки на предыдущих этапах функционирования ковша.

На заключительном этапе моделирования исследовали поведение футеровки ковша при вакуумировании стали в течение 20 мин. Граничными условиями в математической модели выступали тепловой поток, заданный на внешней поверхности футеровки, и коэффициент теплоотдачи в окружающую среду на поверхности кожуха ковша. Значение теплового потока определено исходя из того, что за цикл вакуумирования происходит снижение температуры жидкой стали на 60...80°C. В результате расчётов установлено, что распределение температуры для разных расчётных схем наполнения ковша порциями металла имеет такую же картину, как и на момент завершения предыдущего этапа (рисунок 11). Уровень температуры практически не изменился, с небольшими колебаниями 2...5°C в сторону снижения. Т.е. выполнение данной технологической операции не вызвало существенного изменения теплового состояния футеровки и кожуха ковша.

Обобщённые по времени всего цикла работы ковша картины изменения температуры в характерных сечениях №5 (нижняя часть) и №7 (верхняя часть) приведены на рисунке 12.

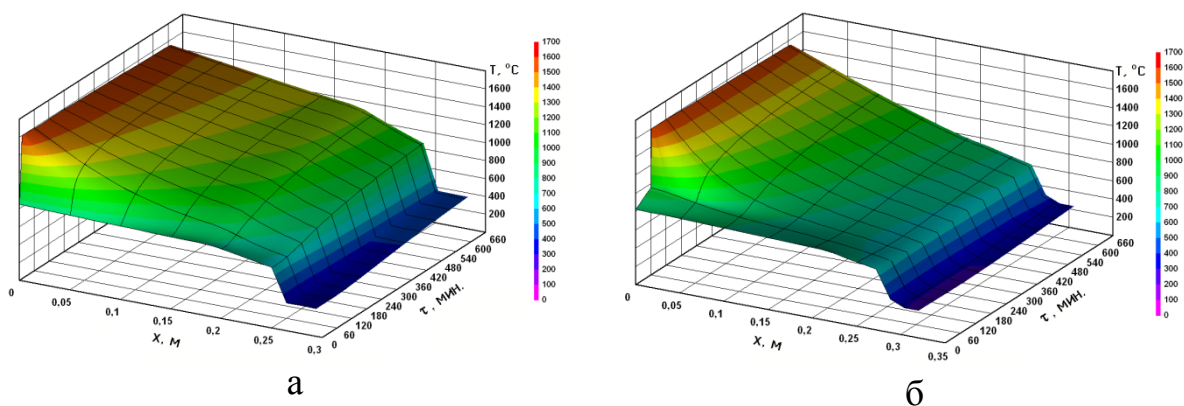


Рисунок 12 – Изменение во времени температуры в характерных сечениях №5 (а) и №7 (б) футеровки ковша при наполнении ковша по схеме 45+43 т.

Можно отметить, что резкие перепада температуры происходят в первом слое футеровки на начальной стадии эксплуатации ковша после наполнения первой порцией жидкой стали. Далее в ходе всех рассмотренных технологических операций температура футеровки и кожуха возрастает, однако более равномерный прогрев по толщине характерен для нижней части ковша.

Выводы

Таким образом, проведённое исследование позволило установить характер распределения температуры в футеровке 90-тонного сталеразливочного ковша, который используется для выполнения различных техно-

логических операций с разными порциями жидкой стали. Выявлено, что после подготовки ковша рабочий слой футеровки имеет практически однородную температуру по всей высоте коша. Наполнение ковша первой порцией жидкой стали вызывает резкий перепад температуры в огнеупорах первого слоя футеровки, который может вызывать зарождение трещин в радиальном направлении. Кроме того при заполнении ковша порциями меньшими номинальной вместимости в первом слое футеровки стен для верхней и средней части возникает значительный температурный градиент в вертикальном направлении, что приведёт к развитию вертикальных трещин. Добавление последующих порций металла вызывает перепады температуры в футеровке средней части ковша. Причём, для случаев наполнения ковша первой порцией малого объёма отмечаются большие перепады температуры, т.е. предпочтительно первую порцию металла иметь более 45 т. Дальнейшие операции подогрева стали и длительной выдержки приводят к выравниванию температур по слоям футеровки как в радиальном, так и вертикальном направлении, что должно сказаться на замедлении развития трещин, образовавшихся на предыдущих этапах функционирования ковша. В целом, полученные результаты являются основой для последующего исследования термомеханических напряжений в футеровке ковша.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. Andreev K. Lining design for vessels of the steel industry – application of finite element calculations // Metal. 15-17.5.2001, Ostrava. Pp. 1–10.
3. Аксельрод Л.М. Сталеразливочный ковш – объект энергосбережения / Л.М. Аксельрод, В.Г. Мизин, М.К. Филяшин [и др.] // Новые огнеупоры. – 2002, №3 – С.52–55.
4. Вихлевщук В.А. Высокотемпературный нагрев футеровки сталеразливочных ковшей / В.А. Вихлевщук, А.С. Стороженко, А.П. Шкирмонтов [и др.] // Чёрная металлургия. – 1992, №9. – С.13–21.
5. Zabolotsky A.V. Computer simulation of thermal shock in refractory lining of metallurgical installations // Proceedings of the 2010 international conference on Mathematical models for engineering science (MMES'10), Puerto De La Cruz, Tenerife, November 30 – December 2, 2010. - Pp.73–76.

Надійшла до редакції 02.06.2011

Рецензент д.т.н., проф. О.М. Смірнов

© Ошовская Е.В., Салмаш И.Н., Фоменко Д.А.