

УДК 621.746.3:669.184

© Бейцун С.В.¹, Михайловский Н.В.², Мурдий В.Ю.³**ИССЛЕДОВАНИЕ НА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ
РАЗОГРЕВА СТАЛЕРАЗЛИВОЧНЫХ КОВШЕЙ**

На основании анализа конструкции и технологии разогрева сталеразливочных ковшей разработана компьютерная модель для прогнозирования их теплового состояния. В результате решения методом конечных элементов краевой задачи, описываемой дифференциальными уравнениями в частных производных, получено изменение температурного поля футеровки ковша при его подготовке под выпуск стали на установке высокотемпературного разогрева.

Ключевые слова: сталеразливочный ковш, футеровка, температурное поле, метод конечных элементов, моделирование.

Бейцун С.В., Михайловський М.В., Мурдій В.Ю. Дослідження на комп'ютерній моделі розігріву сталерозливних ковшів. На підставі аналізу конструкції і технології розігріву сталерозливних ковшів розроблена комп'ютерна модель для прогнозування їх теплового стану. Як результат рішення методом кінцевих елементів крайової задачі, описуваної диференціальними рівняннями у часткових похідних, отримано змінювання температурного поля футеровки ковша під час його підготовки під випуск сталі на установці високотемпературного розігріву.

Ключові слова: сталерозливний ківш, футеровка, температурне поле, метод кінцевих елементів, моделювання.

S.V. Beitsun, M.V. Mikhajlovsky, V.Y. Murdy. Research on computer model of the steel ladles heating. Heating of the ladle is carried out to reduce the heat loss of the molten metal and prevent the destruction of the ladle lining, that arises from the sharp temperature gradient in the initial period of the melt outlet. Thermal preparation of ladles is carried out in the plants for drying and high-temperature heating. The temperature conditions and duration of heating are set empirically depending on the physical properties of lining materials. To control the ladle preparation process the operation conditions must provide for predetermined temperature profile across the lining with minimum possible specific expenditure of fuel under the conditions of variable efficiency of the unit. To control thermal preparation of the ladle it is necessary to predict the temperature distribution in the ladle lining. On the strength of the analysis of the heating technology and the design of the 120-ton ladle the computer model of the thermal state based on the finite element method was developed. As a result of the simulation the temperature distribution across the layers of the lining during 24 hours was obtained. The simulation model can be used as a predictor in the development of ACS in the preparation of the ladles. The model of the thermal state of the lining can be used not only for the selection of the optimum heating but also for the evaluation of technical solutions to improve the design of the ladles and other metallurgical units.

Keywords: ladle, lining, temperature field, final element method, simulation.

Постановка задачи. Разогрев сталеразливочных ковшей производится с целью снижения тепловых потерь жидкого металла и недопущения разрушения рабочей футеровки ковша, что связано с резким перепадом температур в начальный период выпуска расплава [1]. Термическая

¹ канд. техн. наук, доцент, Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск, beitsoun@ua.fm

² канд. техн. наук, доцент, Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск, mnv-60@yandex.ua

³ студент, Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск, murdiy.vlad@live.com

подготовка ковшей осуществляется на установках сушки и высокотемпературного разогрева.

Температурные режимы, а также продолжительность разогрева устанавливаются на основе экспериментальных данных для определенного типа футеровки в зависимости от ее физических свойств. Расход топлива, в качестве которого, как правило, используется природный газ, зависит от внешних условий и конструкции установок [2]. Разогрев рабочего слоя сталеразливочных ковшей ведется открытым факелом [3].

Задача управления процессом подготовки ковша заключается в выборе и поддержании такого режима работы установки, который обеспечит получение заданного температурного профиля по слоям футеровки с минимально возможной удельной затратой топлива в условиях переменной производительности агрегата. Существенным недостатком современных АСУ установками высокотемпературного разогрева является отсутствие информации о степени готовности ковша.

Для обоснованного выбора режимов термической подготовки сталеразливочных ковшей необходимо иметь представление о динамике температурного поля футеровки стенок и днища ковша. Поскольку существующие технические средства не позволяют в производственных условиях оперативно контролировать распределение температуры футеровки ковша, для управления технологическим процессом ее необходимо прогнозировать.

Анализ последних исследований и публикаций. Исследованию теплового состояния сталеразливочных ковшей при внепечной обработке стали посвящено множество работ. В частности, в работе [4] предложена технология автоматического определения теплосодержания сталеразливочного ковша. Математическая модель изменения теплосодержания футеровки и исследование изменение температуры расплава в зависимости от времени технологических операций ковшевой обработки приведены в работе [5]. В статье [6] предложена математическая модель для определения изменения теплосодержания футеровки сталеразливочного ковша при различных технологических операциях. В статье [7] представлены результаты исследования теплового состояния сталеразливочного ковша при переменной тепловой нагрузке.

Цель статьи. Разработать математическую модель изменения теплосодержания футеровки сталеразливочного ковша для определения рациональных режимов его термической подготовки под выпуск стали.

Изложение основного материала. Для моделирования процесса разогрева сталеразливочных ковшей использован метод конечных элементов, позволяющий численно решать широкий спектр физических задач, которые математически формулируются в виде системы дифференциальных уравнений или в вариационной постановке. В настоящее время существует немало программных продуктов [8, 9] для решения краевых задач, описываемых дифференциальными уравнениями в частных производных. Они позволяют выполнять линейный и нелинейный температурный анализ в плоской и осесимметричной постановке.

При проведении термического анализа, как правило, интерес представляет распределение температуры, температурный градиент и тепловые потоки. Математическая модель содержит уравнение в частных производных, граничные условия, с которыми решаются эти уравнения и модель материала – константы, которые определяют его теплофизические свойства.

Уравнение краевой задачи нестационарной теплопроводности для тела в декартовой системе координат x, y, z имеет вид

$$K_{xx} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_{yy} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K_{zz} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + w = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

где $T = T(x, y, z, t)$ – поле температур; K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} – коэффициенты теплопроводности в направлении x, y, z ; $w = w(x, y, z, t)$ – мощность внутренних источников тепла; c – удельная теплоемкость материала; ρ – плотность материала; t – время.

Для нахождения частного решения задачи (1) должны быть заданы начальные и граничные условия.

В качестве объекта исследования выбран 120-тонный набивной сталеразливочный ковш. Для расчетов процесса нестационарного теплообмена во время нагрева ковша использованы такие исходные данные: геометрические размеры ковша (внутренний диаметр – 3,00 м, высота

– 4,10 м, его конусность – 0,06); толщина слоев и теплофизические свойства материалов футеровки (с учетом их зависимости от температуры); температура внутренней поверхности футеровки, а также параметры конвективной теплоотдачи в окружающую среду.

Стенки и днище набивного ковша состоят из нескольких слоев разных материалов. Стенки ковша – из хромомagneзитового кирпича (корунда), шамотного кирпича, асбеста и стального кожуха. Днище ковша – из корунда, шамотного кирпича, алюмосиликатного самотвердеющего бетона (АССБ) и стального кожуха. Толщина всех слоев материалов, кроме АССБ, в сечении постоянна. Из-за выпуклости днища ковша толщина слоя АССБ по его оси составляет 150 мм, а к краям сходит на нет. Структура футеровки ковша, а также теплофизические свойства ее компонентов в функции температуры [10] приведены в таблице 1.

Таблица 1

Структура футеровки сталеразливочного ковша и теплофизические свойства ее материалов

Материал	Толщина, мм		Плотность, кг/м ³	Теплоемкость, Дж/(кг·К)	Теплопроводность, Вт/(м·К)
	стенка	днище			
Корунд	150	150	3000	790 + 0,42 T	2,10 + 1,90·10 ⁻³ T
Шамот	65	65	2000	880 + 0,23 T	0,69 + 3,14·10 ⁻⁴ T
Асбест	20	–	700	816 + 0,20 T	0,50 + 5,0·10 ⁻⁴ T
АССБ	–	150	1400	840 + 0,20 T	0,48 + 1,40·10 ⁻⁴ T
Сталь	20	28	7800	462 + 0,17 T	52,0 – 0,020 T

Для моделирования изменения теплосодержания футеровки сталеразливочного ковша при его термической подготовке создана его геометрическая модель, которая содержит соответствующие геометрические объекты, свойства их материалов и граничные условия.

Геометрическая модель сталеразливочного ковша представляет собой усеченный цилиндр с округлым днищем. Для создания объемной геометрической модели был спроектирован базовый эскиз плоской модели ковша, представляющий собой половину вертикального сечения ковша по диаметру. В эскизе были учтены геометрия и расположение каждого слоя футеровки и кожуха ковша. Затем с помощью вращения этого эскиза относительно вертикальной оси получена объемная модель ковша.

Теплофизические свойства материалов футеровки заданы с учетом их линейной зависимости от температуры.

Для получения численного решения выполнено разбиение геометрической модели конечно-элементной сеткой, которая является основой для составления и решения системы уравнений в матричном виде. С целью повышения точности результатов моделирования выбран тетраэдральный тип сетки с шагом 25 мм.

В качестве граничного условия на внутренней поверхности футеровки задан температурный режим сушки и высокотемпературного разогрева, предложенный в [11] для ковша аналогичного типа (рис. 1). Общий цикл сушки и разогрева сталеразливочного ковша составляет 24 часа и состоит из двух этапов: 1) линейный рост температуры на протяжении восьми часов до величины 650°С с выдержкой при этой температуре на протяжении четырех часов; 2) линейный рост температуры на протяжении восьми часов до величины 1100°С с выдержкой при этой температуре на протяжении четырех часов.

Моделирование нестационарного нагрева стенки и днища ковша проводили с учетом начального поля температур слоев футеровки ($T = 30^{\circ}\text{C} = \text{idem}$). От внешней поверхности ковша в окружающую среду с постоянной температурой 30°С теплота отводится конвекцией и излучением. Согласно расчетам, приняты следующие средние значения приведенных коэффициентов теплоотдачи: 20 Вт/(м²·К) – для боковой поверхности ковша и 9,5 Вт/(м²·К) – для его днища.

В результате моделирования получено температурное поле футеровки ковша после его разогрева, которое представлено на рис. 2.

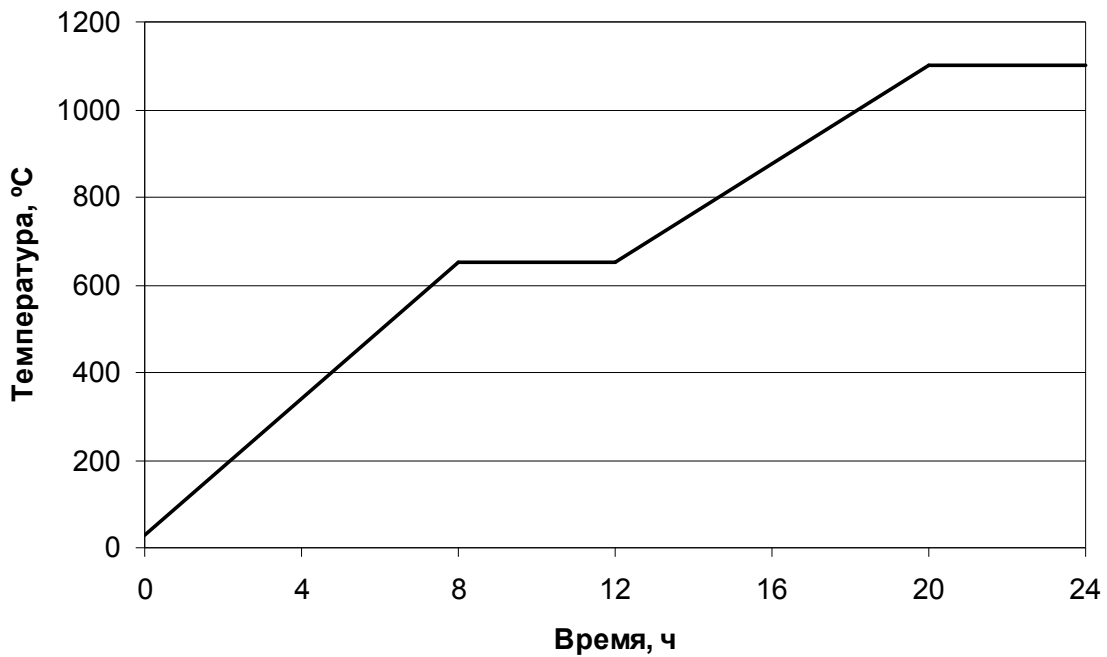


Рис. 1 – График температуры внутренней поверхности футеровки ковша

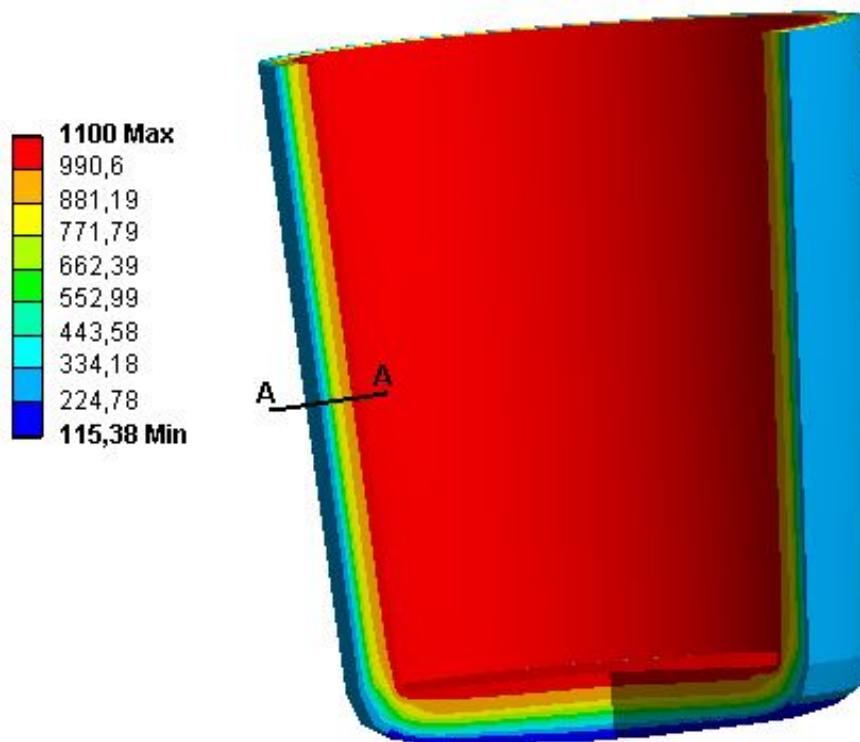


Рис. 2 – Температурное поле футеровки ковша после разогрева

На графике рис. 3 сплошной линией показано распределение температуры по толщине футеровки стенки ковша в сечении А-А по окончании его разогрева. На графике рис. 4 показано сплошной линией распределение температуры по толщине футеровки относительно оси днища ковша по окончании его разогрева. Для сравнения, на этих рисунках пунктирными линиями показаны теоретические профили температуры при установившемся режиме теплопередачи, соответствующие температуре внутренней поверхности футеровки 1100°C.

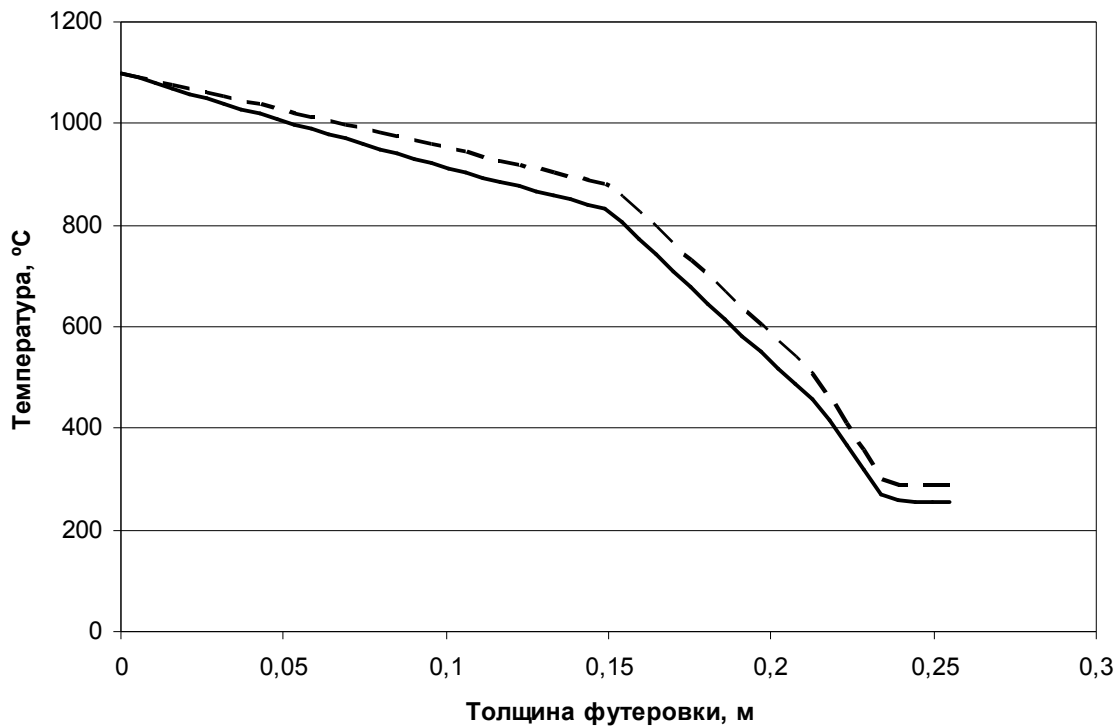


Рис. 3 – Распределение температуры футеровки стенки разогретого ковша в сечении А–А

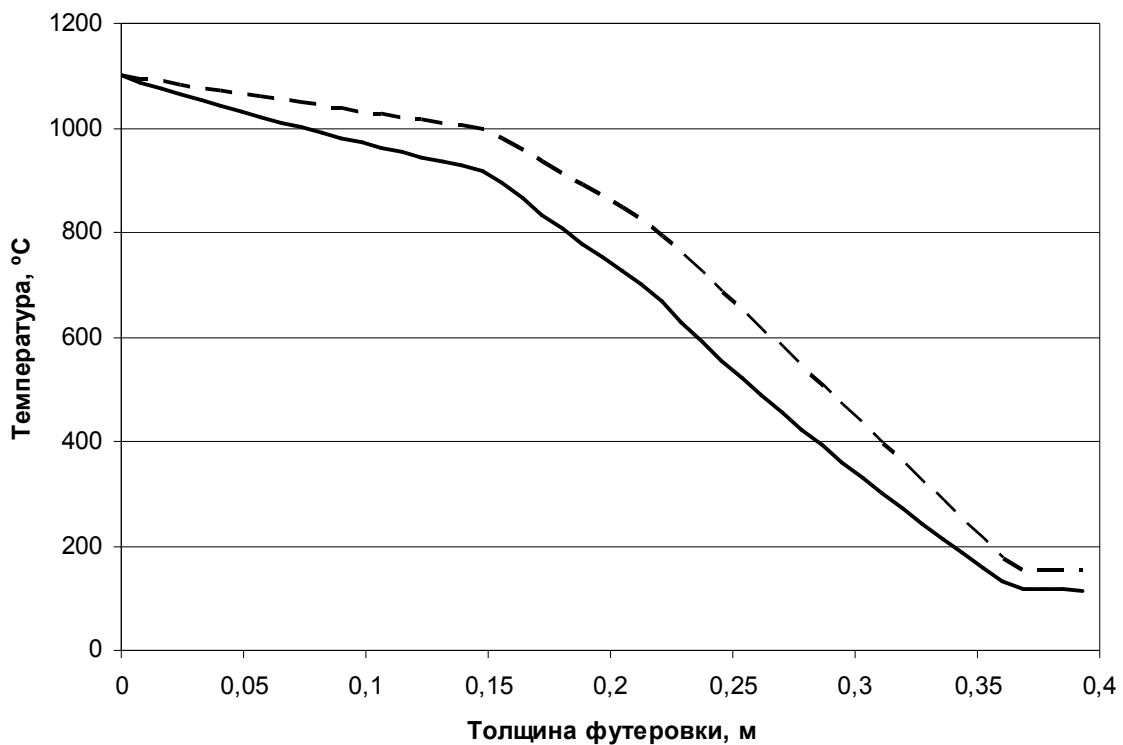


Рис. 4 – Распределение температуры футеровки по оси днища разогретого ковша

Результаты моделирования, выполненного в соответствии с указанным режимом разогрева ковша, показывают, что стенки ковша успевают достаточно хорошо прогреться, поскольку распределение температуры по толщине футеровки близко к профилю при установившемся режиме теплопередачи. А вот днище ковша прогревается недостаточно.

Выводы

На основании анализа конструкции и технологии разогрева сталеразливочных ковшей разработана компьютерная модель, позволяющая получать распределение температуры по слоям футеровки при различных режимах термической подготовки ковша. Эту модель можно использовать в качестве прогнозирующей при разработке АСУ подготовкой ковшей. Модель теплового состояния футеровки может быть полезна не только для выбора оптимальных режимов разогрева, но и для оценки технических решений по усовершенствованию конструкции ковшей и других металлургических агрегатов.

Список использованных источников:

1. Вихлевщук В.А. Ковшечная доводка стали / В.А. Вихлевщук, В.С. Харахулах, С.С. Бродский. – Днепропетровск : Системные технологии, 2000. – 190 с.
2. Огурцов А.П. Производство стали от старта до финиша. Сталеразливочный ковш и внепечные технологии / А.П. Огурцов. – Днепропетровск : ДГТУ, 2011. – Т. 2. – 275 с.
3. Система управления станом сушки и высокотемпературного разогрева сталеразливочных ковшей / В.А. Спиринов [и др.] // Современные технологии автоматизации. – 2000. – №3. – С. 66-71.
4. Технология автоматического определения теплосодержания сталеразливочного ковша / С.В. Агеев [и др.] // Металлург. – 2011. – №5. – С. 48-52.
5. Бейцун С.В. Тепловое состояние ковшей при внепечной обработке стали / С.В. Бейцун, Н.В. Михайловский, В.И. Шибакинский // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – №4. – С. 104-107.
6. Бейцун С.В. Моделирование теплового состояния сталеразливочных ковшей / С.В. Бейцун, Н.В. Михайловский // Металлургическая теплотехника : Сб. науч. тр. / Национальная металлургическая академия Украины. – Днепропетровск : Новая идеология, 2012. – Вып. 4 (19) – С. 3-8.
7. 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.
8. ELCUT. Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных элементов. Руководство пользователя. – СПб : ООО «Тор», 2013. – 295 с.
9. Инженерный анализ в ANSYS Workbench : учебное пособие / В.А. Бруйка [и др.]. – Самара : Самарский государственный технический университет, 2010. – 271 с.
10. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов : справочное руководство / В.С. Чиркин. – М. : Государственное издательство физико-математической литературы, 1959. – 356 с.
11. Автоматизированная система управления станом вертикальной сушки ковшей / В. Переходченко [и др.] // Современные технологии автоматизации. – 2006. – №3. – С. 32-36.

Bibliography:

1. Vihlevschuk V.A. Ladle steel refining / V.A. Vihlevschuk, V.S. Kharakhulakh, S.S. Brodsky. – Dnepropetrovsk : System Technology, 2000. – 190 p. (Rus.)
2. Ogurtsov A.P. Steel production from start to finish. Steel ladle and secondary steelmaking technologies / A.P. Ogurtsov. – Dneprodzerginsk: DSTU, 2011. – V. 2. – 275 p. (Rus.)
3. The control system stand drying and heating of casting ladles / V.A. Spirin [and other] // Modern automation technology. – 2000. – №3. – P. 66-71. (Rus.)
4. Technology automatically determine enthalpy ladle / S.V. Ageev [and other] // Metallurg. – 2011. – №5. – P. 48-52. (Rus.)
5. Beitsun S.V. Thermal state of ladles with furnace steel processing / S.V. Beitsun, N.V. Mikhailovsky, V.I. Shibakinsky // Metallurgical and Mining Industry. – 2013. – №4. – P. 104-107. (Rus.)
6. Beitsun S.V. Modeling of the thermal state of the steel ladles / S.V. Beitsun, N.V. Mikhailovsky // Metallurgical Heat Engineering : collection of scientific works / National Metallurgical Academy of Ukraine. – Dnepropetrovsk : Novaya ideologiya, 2012. – Issue 4 (19). – P. 3-8. (Rus.)

7. Oshovskaya E.V. Simulation of ladle lining with variable heat load / E.V. Oshovskaya, I.N. Salmash, D.A. Fomenko / Sciences works of DonNTU : Metallurgy. – 2011. – Issue 13 (194). – P. 198-210. (Rus.)
8. ELCUT. Simulation of electromagnetic, thermal and elastic fields of finite element method. User's Guide. – St. Petersburg: «Tor ООО», 2013. – 295 p. (Rus.)
9. Engineering analysis in ANSYS Workbench : textbook / V.A. Bruyaka [and other]. – Samara : Samara State Technical University, 2010. – 271 p. (Rus.)
10. Chirkin V.S. Thermophysical properties of materials : reference / V.S. Chirkin. – M. : State Publishing House of physical and mathematical literature, 1959. – 356 p. (Rus.)
11. Automated control system stand vertical drying buckets / V. Perehodchenko [and other] // Modern automation technology. – 2006. – №3. – P. 32-36. (Rus.)

Рецензент: В.И. Головкин
д-р техн. наук, проф., НМетАУ

Статья поступила 13.03.2015

УДК 669.184.14

© Лухтура Ф.И.*

О СТЕПЕНИ ДОЖИГАНИЯ КОНВЕРТЕРНЫХ ГАЗОВ В КОНВЕРТЕРАХ ВЕРХНЕГО ДУТЬЯ

Рассмотрены причины и степень существующего дожигания конвертерных газов в шлаке и газовой полости конвертера в период продувки конвертерной ванны. Показана их зависимость от параметров истечения кислородного потока из сопел фурм верхнего дутья и других параметров продувки.

Ключевые слова: фурма, сопло, сверхзвуковой поток, конвертерные газы, расплав, эжекция, горение.

Лухтура Ф.И. Про ступень спалювання конвертерних газів у конвертерах верхнього дутья. Розглянуті причини та ступень існуючого спалювання конвертерних газів у шлаку і газовій порожнині конвертеру в період продувки конвертерної ванни. Показана їх залежність від параметрів витікання кисневого потоку з сопел фурм верхнього дутья та інших параметрів продувки.

Ключові слова: фурма, сопло, надзвуковий потік, конвертерні гази, розплав, ежекція, горіння.

F.I. Lukhtura. On degree of converter waste gases afterburning in top-blown converters. The reasons and degree of converter waste gases afterburning in slag and gas cavity of the converter during blowing have been studied. The afterburning is connected with reflection of the circumferential part of an oxygen jet on its length from the nozzles output section to the metal melt surface because of ongoing streams of converter waste gases and slag layer. Thus oxygen assimilation degree because of the above mentioned factors decreases by 5-35 of % depending on regime parameters, the blowing devices design, portable properties of supersonic jets in the high-temperature gas cavity of the converter and melt, on the height of the tuyere arrangement above the melt etc. Afterburning is influenced with the gas jet and the liquid melt interaction at upper blowing which is various at different intensity of blowing and the height of the tuyere arrangement, that is laminar, transient or turbulent. It has been shown, that gas and melt interaction is also influenced with the probability of the disturbances from the surrounding atmosphere transfer into

* ст. преподаватель, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, lukhelena@yandex.ru