

С.П. ПАНТЕЙКОВ, к.т.н., доцент

Е.С. ПАНТЕЙКОВА, магистр

Днепропетровский государственный технический университет, г. Каменское

Математическая модель тепловой работы ошлакованной футеровки стен конвертера при взаимодействии ее с расплавом в ходе кислородной продувки

В работе рассмотрена разработанная авторами математическая модель теплового состояния футеровки стен конвертера при взаимодействии её с расплавом по ходу продувки, учитывающая также наличие на стенах агрегата слоя намороженного шлакового гарнисажа с моделированием его толщины и свойств. С помощью её проведены численные исследования зависимости температуры рабочей поверхности футеровки 250-т конвертера в конце продувки от толщины шлакового гарнисажа при различных коэффициентах его теплопроводности и от коэффициента теплопроводности гарнисажа при различных его толщинах.

In the article the authors developed a mathematical model of the thermal state of the lining of the walls of the converter at its interaction with melt during the purge, also taking into account the presence on the walls of the unit layer of frozen slag skull with simulation of its thickness and properties. With the help of her numerical study of the dependence of the temperature of the working surface of the lining of 250-ton converter at the end of the purge the thickness of the slag skull at different coefficients of thermal conductivity and its coefficient of thermal conductivity of skull with various thicknesses.

Введение

Кислородно-конвертерный процесс (LD-процесс в европейской или ВОР-процесс в американской терминологии) получил быстрое и широкое распространение благодаря своей сравнительной простоте и высокой производительности, поэтому в настоящее время является ведущим сталеплавающим процессом в мире.

Постановка проблемы

Огнеупорная футеровка конвертера (как днища, так и стен) служат в достаточно жёстких условиях, связанных с наличием вертикального (осевого) перепада температур, характерного для всех тепловых агрегатов. Это, как известно [1, 2], является причиной возникновения в теле огнеупорных блоков (кирпичей), из которых состоит футеровка агрегата, градиентов температур, вызывающих появление в огнеупорном материале футеровки термических напряжений, что приводит в последующем к её разрушению, в первую очередь — её рабочего слоя.

С целью повышения стойкости футеровки при выплавке стали в кислородных конвертерах [3] в настоящее время повсеместно используются различные варианты новейшей ресурсо- и энергосберегающей технологии горячих ремонтов футеровки агрегатов — нанесение защитного шлакового гарнисажа на периклазоуглеродистую футеровку конвертеров путём раздувки азотными струями специально подготовленного конечного шлака с высоким содержанием в нём MgO (до 8—14 % и более) с постепенным формированием на поверхности футеровки намороженного слоя прочного шлакового покрытия, которое значительно увеличивает срок службы футеровки агрегатов [4], что является одним из важных показателей работы конвертеров, влияющим на их производительность.

Кроме того, нанесение шлакового гарнисажа на футеровку конвертера приводит к формированию в агрегате жидкого высокоосновного шлака ещё до начала кислородной продувки — при заливке чугуна, так как в этот момент под действием горячего чугуна происходит частичное оплавление шлака, намороженного на стенки и днище конвертера.

Всё это свидетельствует в пользу применения технологий ошлакования с целью формирования на рабочей поверхности огнеупорной футеровки конверте-

ра дополнительного защитного гарнисажного слоя, предохраняющего футеровку от износа и растрескивания.

В связи с этим актуальным является изучение теплового состояния футеровки конвертера при работе агрегата как с ошлакованием футеровки, так и без такового с целью досконального изучения влияния различных факторов на стойкость самого шлакового гарнисажа и огнеупоров футеровки конвертеров при их ошлаковании.

Анализ последних источников и публикаций

Для всестороннего изучения данного вопроса необходимо проведение серии глобальных натуральных исследований на промышленных агрегатах или на высокотемпературных лабораторных установках (что ещё сложнее осуществить), в которых геометрические и тепловые условия были бы подобны таковым в действующих конвертерах. Такие исследования кропотливы, требуют больших затрат труда и значительных средств, а в случае проведения исследований на лабораторных моделях далеко не всегда могут дать достоверные результаты.

Для упрощения экспериментальных работ по исследованию и повышению стойкости футеровки конвертеров необходимо создание математических моделей тепловой работы футеровки, которые также будут учитывать наличие на ней слоя намороженного шлакового гарнисажа с моделированием его толщины, а также свойств применяемого шлака. Для футеровки днища такая модель авторами данной статьи уже была создана [5], проведены численные исследования теплового состояния огнеупоров днища кислородного конвертера с учётом его ошлакования [6, 7] и динамики износа слоя защитного шлакового гарнисажа на днище кислородного конвертера при продувке расплава [8]. Указанная модель стала основой для создания математической модели термонапряжённого состояния огнеупоров днища кислородного конвертера с учётом их ошлакования [9], с помощью которой были проведены численные исследования термических напряжений, возникающих в ошлакованных и неошлакованных огнеупорах днища кислородного конвертера в ходе продувки расплава [10, 11]. Необходимо также провести подобные исследования для футеровки стен конвертера и его горловины.

Исследования данных вопросов в мировой технической литературе нами не было найдено.

Цель работы

Целью данной работы является описание разработанной математической модели теплового состояния футеровки стен конвертера при взаимодействии её с расплавом по ходу продувки, учитывающей наличие на стенах агрегата слоя намороженного шлакового гарнисажа с моделированием его толщины и свойств, а также проведение с помощью данной математической модели численных исследований зависимости температуры рабочей поверхности футеровки 250-т конвертера в конце продувки от толщины шлакового гарнисажа при различных коэффициентах его теплопроводности и от коэффициента теплопроводности шлакового гарнисажа при различных его толщинах.

С помощью данной математической модели можно:

- получать информацию о распределении температур и температурных градиентов по толщине стен футеровки в любой момент операции конвертирования (завалки лома, заливки чугуна, продувки расплава или межплавочных простоев агрегата) с моделированием вида применяемого огнеупорного материала, его толщины и толщины слоя шлакового гарнисажа;

- анализировать влияние вида применяемого огнеупорного материала стен, толщины стен и начальной толщины слоя шлакового гарнисажа, температуры плавления шлакового гарнисажа на распределение температуры и температурных градиентов в огнеупорном материале, которым футеруются стены конвертера;

- определять оптимальные параметры процесса с точки зрения максимального повышения стойкости огнеупоров стен кислородных конвертеров за счёт повышение однородности температурного поля в их огнеупорном материале (т.е. уменьшения в нём температурных градиентов);

- выдавать рекомендации относительно параметров шлакового покрытия с целью эффективной защиты футеровки стен конвертеров за счёт максимально возможного снижения температурных градиентов в их огнеупорном материале при минимально необходимой толщине шлакового покрытия с целью минимизации снижения объёма рабочего пространства конвертера.

Материалы исследований

Разработанная математическая модель предусматривает решение дифференциального уравнения теплопроводности Фурье [12] в цилиндрических координатах (одномерная постановка), что позволяет найти распределение температур и температурных градиентов в расчётной области (по толщине стенки конвертерного агрегата, которая состоит из следующих расчётных областей: «кожух конвертера» + «огнеупорный материал стенки (рабочий и арматурный слои футеровки)» + «шлаковый гарнисаж» + «корка расплава», которая может наморозиться на защитное шлаковое покрытие стенки конвертера):

$$\rho(t,x) \cdot c(t,x) \cdot \frac{\partial t(x,\tau)}{\partial \tau} = \lambda(t,x) \cdot \left(\frac{\partial^2 t(x,\tau)}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \cdot \frac{dt(x,\tau)}{dx} \right),$$

$$0 < x \leq z_2(\tau), \tau > 0. \quad (1)$$

В уравнении (1): $t(x,\tau)$ — температура, как функция текущих координаты x и времени продувки τ , °С;

$\rho(t,x)$, $c(t,x)$, $\lambda(t,x)$ — плотность, кг/м³, теплоёмкость, Дж/(кг·°С), теплопроводность, Вт/(м·°С), материала, как функции текущих температуры t и координаты x .

Решается задача Стефана с двумя подвижными границами $z_1(\tau)$ и $z_2(\tau)$ (соответственно граница раздела твёрдого и жидкого шлака и граница намёрзшей корочки металла и расплава) с граничными условиями III и IV рода.

Граничные условия. Поверхность кожуха стен конвертера обменивается теплом с окружающей атмосферой посредством излучения и свободной конвекции. Между кожухом конвертера и футеровкой стен, футеровкой стен и шлаковым гарнисажем, а так же между шлаковым гарнисажем и намёрзшей на него корочкой расплава существует идеальный тепловой контакт, т.е. на границах соприкосновения указанных материалов заданы условия сопряжения. При отсутствии намёрзшего слоя корочки расплава на рабочей поверхности шлакового гарнисажа происходит конвективный теплообмен слоя шлака с расплавом. В условиях присутствия намороженной корочки расплава на шлаковом гарнисаже происходит конвективный теплообмен указанной корочки с расплавом. Моделью учитывается полное оплавление защитного шлакового гарнисажа и корочки расплава с оголением поверхности футеровки стен конвертера. При этом, на рабочей поверхности футеровки стен происходит конвективный теплообмен огнеупорного материала с высокотемпературным расплавом, а также принимается, что футеровка конвертера не изнашивается (не оплавляется) в результате её контакта с жидкой ванной, так как задача исследования процесса срабатывания футеровки стен конвертера в данной задаче не ставится. На границе раздела жидкого и твёрдого шлака задаётся калометрическое уравнение Стефана, а температура принимается равной температуре плавления шлака. Начальное поле температур по толщине футеровки стен конвертера задаётся в соответствии с требованиями технологической инструкции: $z_1(\tau) = z_2(\tau)$.

Задача решена методом контрольного объёма [13]. Для расчёта размеров движущихся границ плавления-наморозания $z_1(\tau)$ и $z_2(\tau)$ применён численный метод Дюзинбера [14, 15]. Аппроксимация уравнения теплопроводности (1) в его конечно-разностный аналог выполнена по явной разностной схеме расчётов [16, 17]. Программа расчётов написана на алгоритмическом языке Borland Delphi 7 и реализована на ПК применительно к промышленным 250-т конвертерам.

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты исследования температурных полей в футеровке стен конвертера, который покрыт слоем защитного шлакового гарнисажа различной толщины и расположен ниже уровня расплава в ходе его продувки в кислородном конвертере, показала следующие результаты.

С увеличением толщины шлакового гарнисажа, покрывающего футеровку стен конвертера, температура на наружной поверхности футеровки (т.е. на границе «шлаковый гарнисаж»—«футеровка») будет уменьшаться, что, в свою очередь, будет снижать температурный градиент по толщине футеровки стен агрегата. Снижение коэффициента теплопроводности набрызги-

ваемого шлака так же будет способствовать снижению температуры рабочей поверхности футеровки и, соот-

ветственно, снижать температурный градиент в огнеупорном материале футеровки стен конвертера (рис. 1).

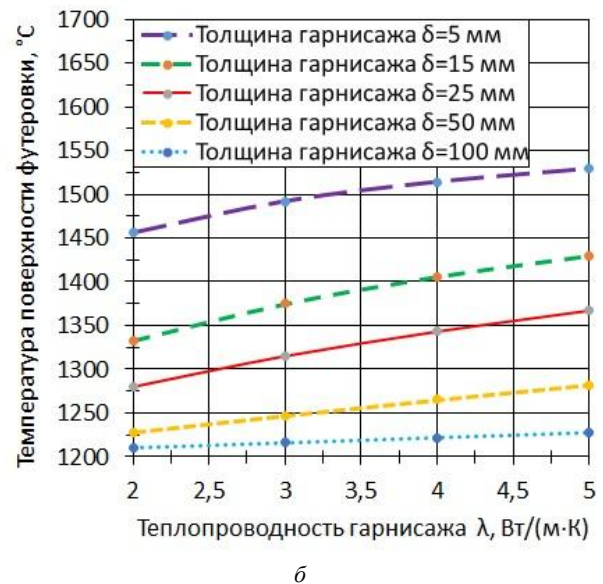
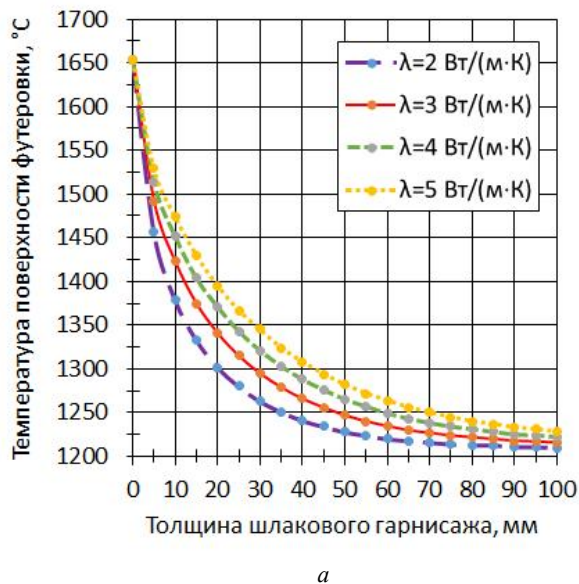


Рис. 1. Зависимости температуры рабочей поверхности футеровки 250-т конвертера в конце продувки от толщины шлакового гарнисажа (а) и от коэффициента теплопроводности гарнисажа (б) соответственно при различных коэффициентах теплопроводности (а) и при различных толщинах (б) шлакового гарнисажа

Снижение температурного градиента и получение более равномерного температурного поля в футеровке стен конвертера приведёт к снижению термических напряжений, возникающих в ней, вследствие нагревания шлакового гарнисажа, который будет предохранять от нагрева высокотемпературным расплавом, находящимся в конвертере, огнеупорную футеровку его стен. Это позволит в ходе продувки избежать вероятности появления трещин внутри футеровки стен в результате снижения растягивающих (+) напряжений, возникающих в футеровке стен, и вероятности скалывания огнеупора на рабочей поверхности футеровки в результате снижения напряжений сдвига, а при простоях конвертера — избежать возникновения трещин на поверхности футеровки, приводящего к срабатыванию рабочего слоя футеровки путём его скалывания, вызванного сжимающими (–) напряжениями.

Результаты численных исследований с применением описанной математической модели, разработанной авторами данной статьи, хорошо коррелируются с подобными данными зарубежных исследователей [18, 19].

Выводы

Разработана математическая модель теплового состояния футеровки стен конвертера при взаимодействии её с расплавом по ходу продувки, учитывающая наличие на футеровке стен агрегата слоя замороженного шлакового гарнисажа с моделированием его толщины, а также свойств шлакового материала. Указанная математическая модель позволила определить условия для снижения температурного градиента, возникающего в футеровке стен агрегата. Полученные данные могут быть использованы в дальнейшем для расчёта термических напряжений в футеровке стен кислородных конве-

ртеров с целью их снижения, что приведёт к значительному повышению стойкости футеровки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стрелов К.К. Теоретические основы технологии огнеупорных материалов. – М.: Metallurgiya, 1985. – 480 с.
2. Стрелов К.К., Кашеев И.Д., Мамыкин П.С. Технология огнеупоров. – М.: Metallurgiya, 1988. – 528 с.
3. Пантейков С.П. Анализ мирового развития и современное состояние технологий ошлакования футеровки кислородных конвертеров // Чёрная металлургия. Бюллетень НТИЭИ. – 2013. – № 6 (1362). – С. 65–78.
4. Oku Susumu, Mimura Mitsutosi, Akamatsu Setuo. Развитие метода нанесения шлаковых покрытий для кислородного конвертера // Тайкадуцу, Refractories. – 1983. – Vol. 35. – № 300. – P. 17–21.
5. Пантейков С.П., Пантейкова Е.С. Математическая модель теплового состояния днища кислородного конвертера с учётом слоя защитного шлакового покрытия // «Современная металлургия нового тысячелетия»: Сб. науч. тр. XI Международной научно-практической конференции (8–11 декабря 2015 г., г. Липецк, Россия). – Часть 1. – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2015. – С. 89–92.
6. Пантейков С.П., Пантейкова Е.С. Численные исследования теплового состояния огнеупоров днища кислородного конвертера с учётом его ошлакования // Проблеми математичного моделювання: Матеріали Всеукраїнської науково-методичної конференції, 25–27 травня 2016р. м. Дніпродзержинськ. – Дніпропетровськ: Біла К.О., 2016. – С. 51–53.

7. Пантейков С.П., Пантейкова Е.С. О температурном состоянии огнеупоров днища кислородного конвертера при его ошлаковании // Сборник трудов XIV Международного Конгресса сталеплавильщиков (г.Электросталь, Россия, 17–21 октября 2016г.). – Москва-Электросталь, 2016. – С. 211–214.
8. Пантейков С.П., Пантейкова Е.С. Численное исследование динамики износа слоя защитного шлакового гарнисажа на днище кислородного конвертера при продувке расплава // Университетская наука 2016: Сборник тезисов докладов международной научно-технической конференции в 4-х т.: Т.1 – факультеты: металлургический, энергетический. – Мариуполь, ГВУЗ “ПГТУ”, 2016. – С. 148–150.
9. Пантейков С.П., Пантейкова Е.С. Математическая модель термонапряжённого состояния огнеупоров днища кислородного конвертера с учётом их ошлакования // “Литье. Металлургия. 2016”: Материалы XII и V Международных научно-практических конференций (24–26 мая 2016 г., г.Запорожье) / Под общ. ред. д.т.н., проф. Пономаренко О.И. – Запорожье, ЗТПЦ, 2016. – С. 393–395.
10. Пантейков С.П., Пантейкова Е.С. Численные исследования термических напряжений, возникающих в огнеупорах днища кислородного конвертера при его ошлаковании // “Стратегия качества в промышленности и образовании”: Материалы XII Международной конференции (30 мая–1 июня 2016 г., г.Варна, Болгария). – Днепропетровск-Варна, 2016. – С. 209–212.
11. Пантейков С.П., Пантейкова Е.С. О термических напряжений, возникающих в огнеупорах днища кислородного конвертера при его ошлаковании // Zbiór artykułów naukowych. Konferencji Międzynarodowej Naukowo-Praktycznej "Inżynieria i technologia. Współczesne problemy i perspektywy rozwoju" (Warszawa (PL), 30.01.2017–31.01.2017). – Warszawa: Wydawca: Sp. z o.o. «Diamond trading tour», 2017. – Str.21–24.
12. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1979. – 344 с.
13. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи. – М.: Мир, 1983. – 512 с.
14. Рагл Р.У. Затвердевание отливок. – М.: Машгиз, 1960. – 391 с.
15. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах / В.И.Тимошпольский, И.А.Трусова, А.Б.Стеблов, И.А.Павлюченков // Под общ. ред. В.И.Тимошпольского. – Минск: Вышэйшая школа, 1992. – 217 с.
16. Самарский А.А. Введение в теорию разносных систем. – М.: Наука, 1971. – 552 с.
17. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы: Учебное пособие для вузов. – М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1989. – 432 с.
18. Akio I. Поведение углеродсодержащих огнеупоров при высоких температурах // Тайкабуцу = Refractories. – 1988. – 40, № 10. – С.605.
19. Огнеупоры для конвертеров с комбинированной продувкой / E.Todataka, S.Hirashi, Y.Hirashi, I.Akio // Тайка дзайрё = Refrac. Mater. – 1990. – № 138. – С. 69–85.

пост. 25.10.2017