Д. т. н. **А. Н. Смирнов**[1] (✉), **Г. Г. Немсадзе**[2], **К. Н. Шарандин**[2], **А. Ф. Тонкушин**[2], **Д. В. Рябый**[3], **А. Ю. Лизун**[2]

[1] *Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, г. Киев, Украина*
[2] *ПАО «Дженерал Инвестмент Ресурсес», г. Днипро, Украина*
[3] *Донбасский государственный технический университет, г. Лисичанск, Украина*

УДК 666.76.017:620.193.93]:66.041.57

РОТОРНАЯ ПЕЧЬ ДЛЯ СРАВНИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ЭРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ОГНЕУПОРНЫХ ИЗДЕЛИЙ ТЕПЛОВЫХ АГРЕГАТОВ

Представлены результаты сравнительных испытаний огнеупорных бетонов в лабораторной печи роторного типа, с помощью которой можно моделировать условия, реально существующие при эксплуатации в тепловых агрегатах. Это, в свою очередь, позволяет дать объективный прогноз эффективности применения различных огнеупоров в качестве футеровочного материала для того или иного теплового агрегата. Кроме того, можно проводить динамические исследования нескольких типов огнеупорных изделий в процессе одного эксперимента и, соответственно, сравнительный анализ огнеупоров в конкретной агрессивной среде.

Ключевые слова: *огнеупоры, роторная печь, износ футеровки, сравнительный анализ, эрозионная стойкость.*

Значимость огнеупоров в технологическом процессе сложно переоценить, поскольку трудно назвать хотя бы один промышленный процесс, в котором так или иначе не используют огнеупорные материалы. Это обстоятельство выделяет огнеупорные материалы в одно из важнейших направлений мировой экономики, без них невозможно было бы производить многие виды продукции, необходимые в современном мире.

Наблюдая за непрерывной трансформацией технологических процессов выплавки и разливки стали на протяжении последних 10–15 лет, связанной с дифференциацией выпускаемого сортамента и модернизацией технологических агрегатов (повышение производительности и функциональных возможностей), можно отметить существенное ужесточение условий эксплуатации футеровки тепловых агрегатов. Это сокращает срок их службы и, как следствие, приводит к увеличению удельного расхода огнеупоров и повышению себестоимости готовой продукции. Ключевым инструментарием снижения удельного расхода огнеупоров являются создание новых видов огнеупорных материалов, технологические усовершенствования при их производстве, развитие новых схем футеровки технологических агрегатов, совершенствование условий эксплуатации и ремонта футеровки и т. п. [1].

Установки и методы, позволяющие оценить качество огнеупоров или спрогнозировать их поведение в процессе эксплуатации с минимальными энергетическими затратами и аварийными рисками, имеют широкую перспективу использования. Одной из наиболее функционально эффективных установок для определения износоустойчивости футеровки тепловых агрегатов, оценки степени адгезии материалов по уходу (ремонту) за футеровкой и изучения взаимодействия огнеупоров со шлаками являются мини-роторные (вращающиеся) печи [2–4]. Применение таких печей позволяет имитировать практически все стадии износа огнеупора, характерные для кампании футеровки теплового агрегата (конвертер, сталеразливочный ковш, желоб доменной печи и т. д.), в условиях, максимально приближенных к производственным.

Общий и схематичный вид изготовленной установки роторной печи показан на рис. 1. Конструкционное выполнение печи позволяет провести оценку от 6 до 12 образцов в ходе одного испытания. Испытание проводится в роторной (вращающейся) печи, оборудованной кислородно-газовой горелкой, обеспечивающей нагрев до 1700–1800 °С. В качестве теплоносителя можно применять пропан или ацетилен. В основе разработанных методик сравнительного анализа лежат комплексные испытания различных типов огнеупоров на эрозионную и коррозионную стойкость.

✉
А. Н. Смирнов
E-mail: stalevoz@i.ua

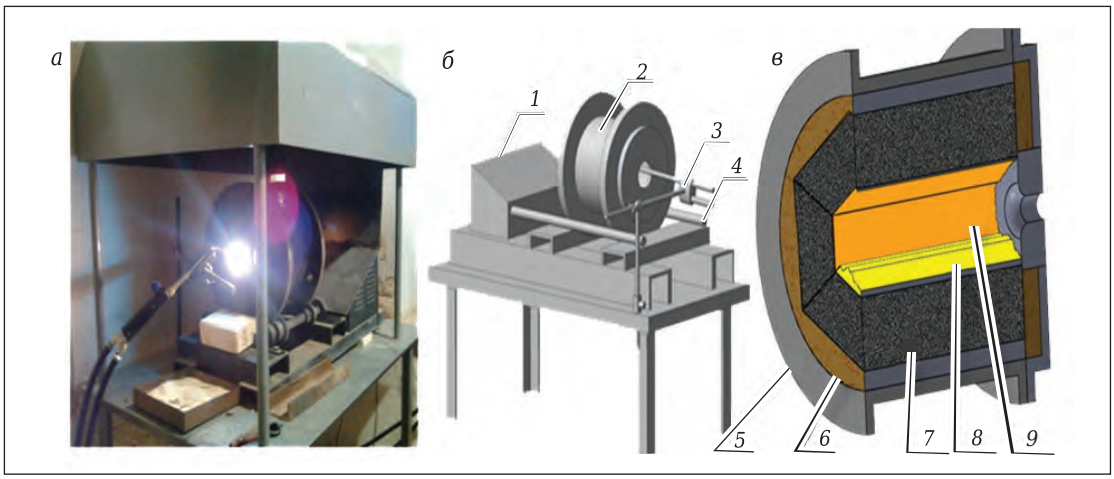

Рис. 1. Общий вид (*а*) и схема установки (*б*, *в*) лабораторного стенда печи роторного типа: *1* — двигатель; *2* — корпус печи; *3* — газокислородная горелка; *4* — приводной вал; *5* — кожух печи; *6* — теплоизоляция; *7* — образец огнеупора; *8* — ванна шлака; *9* — гарнисаж

Процесс формирования футеровки печи включает сборку опытных образцов в так называемую «катушку»; монтаж «катушки» из опытных образцов непосредственно в роторную печь; уплотнение зазора между корпусом печи и опытными образцами; окончательную сборку печи и затяжку торцевой крышки; установку собранной печи на приводные ролики. Электродвигатель позволяет варьировать частоту вращения печи в широком диапазоне — от 0,1 до 10 об/мин. В каждое испытание включается «стандартный» образец с условно-известным показателем стойкости. При этом подаваемый во внутреннюю полость вращающейся печи шлак предварительно дробится, его расход на одно испытание составляет от 2 до 5 кг. Температура, частота вращения печи и длительность испытания зависят от решаемой задачи, видов огнеупоров, типа шлака и т. п. Установка позволяет проводить длительные многочасовые испытания при максимальной температуре до 1700–1750 °С, а также моделировать перепады температур необходимое число раз.

После завершения цикла испытаний и охлаждения печи футеровку разбирают, а образцы разрезают на темплеты. Далее количественной оценке подвергают следующие параметры (рис. 2): размер эрозии и глубину пропитки огнеупора шлаком; глубину инфильтрации компонентов шлака; образование вторичных компонентов в объеме изделий; наличие термических трещин или их отсутствие. В завершение проводят сравнительную оценку устойчивости изделий к воздействию агрессивного шлака. Установлено, что разработанная методика оценки эрозионной стойкости огнеупоров во вращающейся печи обеспечивает хорошо воспроизводимые и достоверные результаты. Более детальное описание исследований эрозионной стойкости приведено ниже на при-

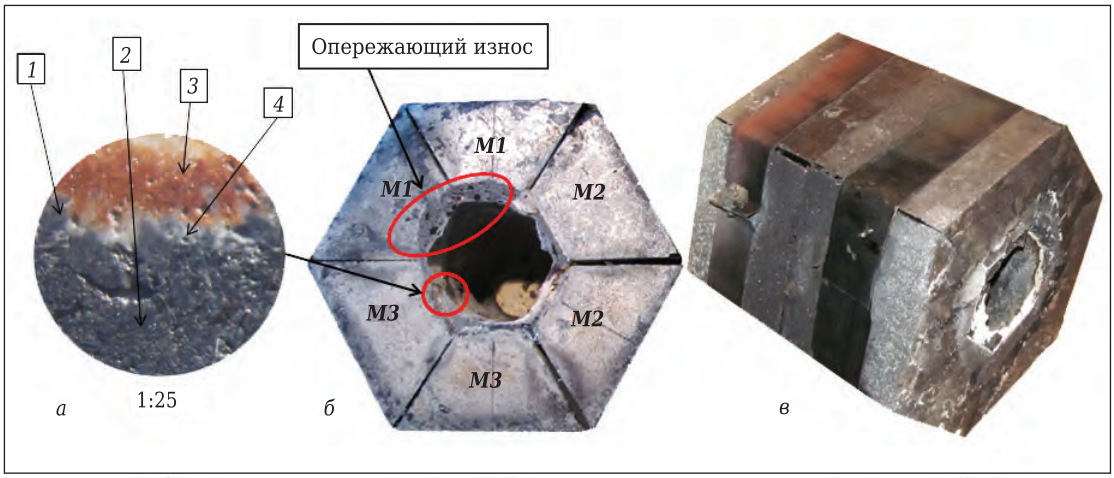

Рис. 2. Общий вид образцов после испытания: *а* — макроструктура границы раздела шлак – огнеупор; *б* — поперечный срез футеровки; *в* — общий вид футеровки после испытания; *М1*, *М2*, *М3* — марки различных огнеупоров; *1* — зерно огнеупорного наполнителя; *2* — спеченная связка; *3* — шлак; *4* — пропитанный слой

мере сравнительного теста изделий из высокоглиноземистых бетонов.

На практике высокоглиноземистые бетоны широко используют для футеровки сталеразливочных ковшей, а также при изготовлении ряда штучных изделий (продувочные и гнездовые блоки, коллекторы и пр.). Как правило, к футеровке и изделиям из высокоглиноземистых бетонов предъявляются высокие требования по эрозионной стойкости. Известно большое количество разных марок бетонов, которые производятся различными фирмами. Однако приводимых данных относительно химического состава бетонов недостаточно для оценки их эксплуатационных показателей. Дополнительную информацию можно получить при проведении тестов на роторной печи.

Для испытаний были изготовлены шесть образцов толщиной 68 мм из разных марок бетонов, которые используют в футеровке сталеразливочных ковшей: *1* — из корундошпинельного низкоцементного тиксотропного бетона (Al_2O_3 94 %, MgO 5 %, CaO 0,4 %); *2* — из корундопериклазового низкоцементного бетона на основе табулярного глинозема с добавкой спеченного периклаза (Al_2O_3 92,5 %, MgO 5,4 %, CaO 1,5 %); *3* — из корундошпинельного низкоцементного бетона на основе табулярного глинозема (Al_2O_3 94 %, MgO 5 %, CaO 1,4 %); *4* — из бетона, аналогичного бетону образца *3*, с добавкой микросилики (SiO_2 0,3 %); *5* — из бесцементного бетона на основе корунда, полученного при рециклинге корундовых изделий, с добавкой микросилики и спеченного периклаза (Al_2O_3 92 %, MgO 7 %, CaO 0 %, SiO_2 0,75 %); *6* — из бесцементного бетона на основе табулярного глинозема с добавкой микросилики и спеченного периклаза (Al_2O_3 92 %, MgO 7 %, CaO 0 %, SiO_2 0,75 %). Общий вид образцов показан на рис. 3.

Процесс футерования печи осуществляли следующим образом: предварительно подготовленные образцы (см. рис. 3) собирали в «катушку», которую затем устанавливали в корпус печи, формируя рабочее пространство установки. Зазор между корпусом печи и опытными образцами уплотняли огнеупорным порошком для снижения теплопотерь и расхода теплоносителя, необходимого для проведения эксперимента. Для фиксации катушки устанавливали торцевую крышку и выполняли стяжку для надежной герметизации печи. Собранный корпус печи с экспериментальными образцами укладывали на приводные ролики. Испытания образцов проводили в течение 5 ч при 1650–1660 °С. В качестве источника тепла использовали газокислородную горелку.

Для моделирования эрозионного износа испытуемых образцов был выбран конечный шлак, получающийся в конвертере. Этот шлак обладает повышенными химической агрессивностью и жидкотекучестью, что позволяет интенсифицировать процесс износа огнеупоров и тем самым сократить длительность эксперимента в агрессивной среде. При этом дробленый шлак подавали в рабочее пространство печи определенными порциями. В процессе проведения экспериментов каждые 80–90 мин производили скачивание шлака с его последующим обновлением. Расход шлака на одно испытание составил порядка 4,2 кг. Химический состав применяемого шлака, мас. %: MgO 7,5, SiO_2 18,5, CaO 43,4, $Fe_{общ}$ 22,3, S 0,21, MnO 6,9; основность 2,75.

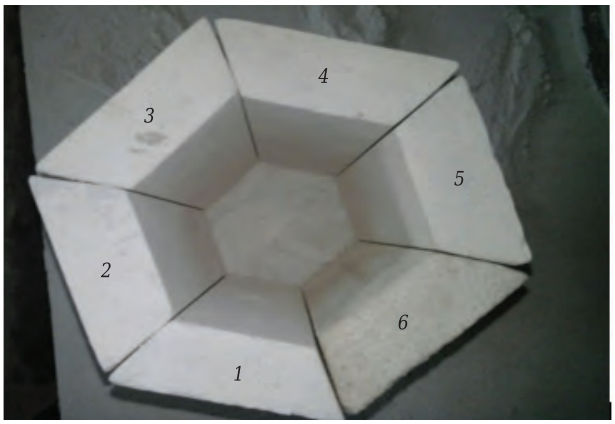

Рис. 3. Общий вид тестируемых образцов *1–6* перед установкой в печь роторного типа

Для имитации эрозионного воздействия жидкой стали на поверхность огнеупора в объеме внутреннего пространства печи постоянно поддерживали жидкую ванну расплава шлака объемом 190–220 мл. По окончании испытания из печи удаляли весь шлак, и печь остывала на открытом воздухе. После этого демонтировали корпус печи и извлекали испытуемые изделия. Сравнительный анализ износа образцов в роторной печи выполняли по двум основным показателям: величине инфильтрации шлака и степени эрозионного разрушения образца за весь цикл тестирования. Результаты измерений размера эрозии образцов и глубины проникновения шлака в бетон приведены в таблице. Общий вид поперечных сечений образцов показан на рис. 4. Для каждого испытуемого образца выполняли по пять измерений в разных точках сечения. Полученные измерения усредняли. Точность измерений составляла ± 0,3 мм.

Результаты измерений размера эрозии и глубины проникновения шлака в образцы (*1–6*) бетонных изделий

Показатели	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*
Размер эрозии, мм	16,1	12,2	10,2	9,8	9,7	8,0
Глубина проникновения шлака, мм	1,2	5,8	1,1	2,9	1,2	2,0
Совокупное уменьшение толщины образца, %	25,5	19,5	17,3	21,2	17,6	16,1

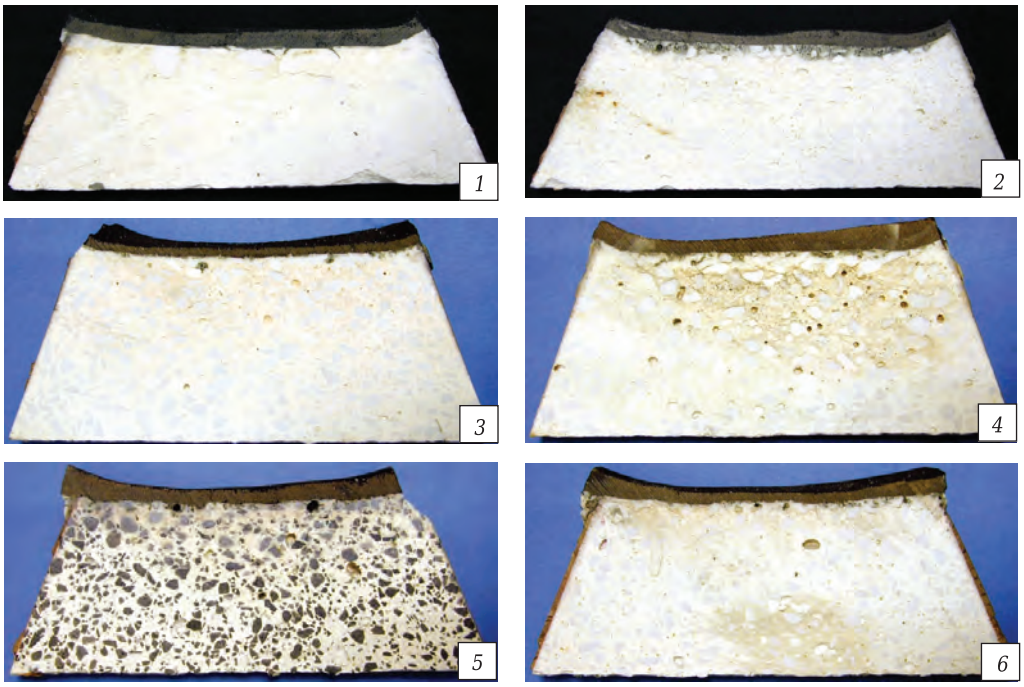

Рис. 4. Общий вид продольных сечений образцов *1–6* из тестируемых бетонов после испытаний в роторной печи

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эффективной установкой для сравнительной оценки коррозии и эрозии огнеупорных материалов после их службы в тепловых агрегатах является роторная печь, в которой испытуемые образцы, как и в промышленных печах, подвержены целому комплексу воздействий: высокой температуре, циклическим теплосменам при каждом обороте печи (30–200 °С), химическому воздействию компонентов шлакового расплава, механическим нагрузкам вследствие динамических условий испытания (изменение частоты вращения печи из-за порционных загрузок шихты, технологических остановок, настройки горелки и др.) и т. п.

Разработанная методика тестирования отвечает требованиям к исследовательскому оборудованию, а результаты испытаний могут служить объективной оценкой эффективности применения того или иного огнеупора в качестве футеровочного материала для конкретного плавильного агрегата и конкретного предприятия. Предлагаемый метод позволяет имитировать все основные стадии износа огнеупора, характерные для кампании футеровки, в условиях, максимально приближенных к производственным.

Библиографический список

1. ***Аксельрод, Л. М.*** Огнеупорная индустрия и изменения / *Л. М. Аксельрод* // Черная металлургия. — 2017. — № 10. — С. 3–14.

2. ***McEwan, N.*** The product development and continuous improvement process for refractories in the base metals industry / *N. McEwan, R. A. Parry, T. Courtney* [et al.] // 6th Southern African Base Metals Conference. — 2011. — P. 443–461.

3. ***Аксельрод, Л. М.*** Метод определения шлако- и клинкероустойчивости огнеупорных изделий для вращающихся печей / *Л. М. Аксельрод, А. Г. Марясев, А. А. Платонов* // Новые огнеупоры. — 2013. — № 4. — С. 59–64.

Aksel'rod, L. M. Method of determining the resistance of furnace refractories to slag and clinker / *L. M. Aksel'rod, A. G. Maryasev, A. A. Platonov* // Refractories and Industrial Ceramics. — 2013. — Vol. 54, № 2. — P. 135–140.

4. ***Guichard, J. L.*** Improvements of corrosion rotary kiln test / *J. L. Guichard, B. Collignon, A. Stuppfler* [et al.] // 60th International Colloquium on Refractories, Aachen, Germany. October 18–19, 2017. — P. 188. ■

Получено 09.01.18
© А. Н. Смирнов, Г. Г. Немсадзе, К. Н. Шарандин, А. Ф. Тонкушин, Д. В. Рябый, А. Ю. Лизун, 2018 г.