К. т. н. **В. В. Словиковский, А. В. Гуляева** (✉)

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет», г. Екатеринбург, Россия

УДК 669.531.5:66.043.1

БЕЗАВАРИЙНАЯ КОНСТРУКЦИЯ ФУТЕРОВКИ ПОВЫШЕННОЙ СТОЙКОСТИ ВЕЛЬЦ-ПЕЧЕЙ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

По результатам работы изучены причины образования крупных настылей. Исследован ряд высокотемпературных огнеупоров магнезиального состава, обладающих наименьшей пропиткой реагентами плавки, высокими температурой службы и абразивоустойчивостью. Установлено, что наиболее стойким огнеупором к реактивам является периклазохромитовый плавленый огнеупор с повышенным содержанием Cr_2O_3 (ПХПП). Выбрана зона применения ПХПП и установлено сочетание участков огнеупоров ПХПП и ПХС. Изучена теплопроводность огнеупоров ПХС и ПХПП. Испытания показали отсутствие образования настылей в реакционной зоне, увеличение стойкости футеровки вельц-печей на Усть-Каменогорском свинцово-цинковом и Лениногорском полиметаллическом комбинатах в 1,6–1,8 раза.

Ключевые слова: *периклазохромит, плавленый огнеупор, пропитка огнеупора, термостойкость, высокотемпературный клей, настыль, коррозия, эрозия.*

Наиболее изнашиваемой из футеровок вращающихся печей является футеровка вельц-печей из-за жестких условий эксплуатации: высокой температуры (1400–1500 °С), агрессивности шихты (большое количество FeO, Fe_2O_3, Fe_3O_4, SiO_2, Pb, Zn и др.), низкой вязкости жидкого расплава, наличия газообразной фазы Pb, Zn. Как показала практика, нецелесообразно применение в вельц-печах футеровок, удовлетворительно работающих во вращающихся цементных печах. Для футеровки вельц-печей необходимо применять огнеупорные изделия марок ПХС, ХПТ, ПХП и др.

Цель настоящей работы: ликвидация аварийных ситуаций, которые вызывают настыли, возникающие вследствие пропитки огнеупорных изделий реагентами шихты; исследование огнеупоров, имеющих минимальную пропитку реагентами плавки; увеличение стойкости футеровки вельц-печей большого диаметра.

Футеровка любой вельц-печи — наиболее ответственная часть ее конструкции (рис. 1). От качества футеровки зависят продолжительность кампании и основные технико-экономические показатели передела. Так, в настоящее время длительность кампании составляет от 1 до 3 мес, вследствие чего требуется проведение частых ремонтов с использованием большого количества дорогостоящих огнеупорных материалов и применением значительной доли ручного труда каменщиков высшей квалификации.

✉
А. В. Гуляева
E-mail: a.gulyaewa2012@yandex.ru

Основные причины малой стойкости футеровок вельц-печей:

– коррозионный износ в результате химического взаимодействия реагентов шихты с огнеупорными материалами в процессе эксплуатации;

– абразивный износ, вызываемый большим количеством перерабатываемой шихты;

– скалывание огнеупорных изделий из-за переменных тепловых нагрузок и большой скорости разогрева и охлаждения кладки, а также возникновения зональности огнеупорных изделий вследствие пропитки их реагентами расплава шихты на глубину до 150 мм. На границе зон образуются параллельные рабочей поверхности кладки трещины из-за различных температурных коэффициентов линейного расширения зон огнеупора (рис. 2);

– образование в реакционной зоне настылей массой до 1500 кг вследствие пропитки футеровки легкоплавкими составляющими шихты с последующим отрывом настылей от кладки, что приводит к разрушению выходной части печи,

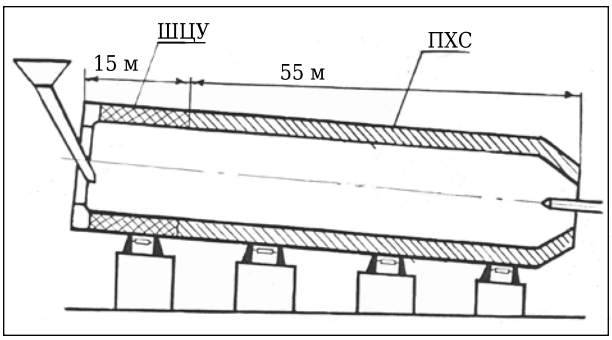

Рис. 1. Однослойная футеровка вельц-печи большого диаметра

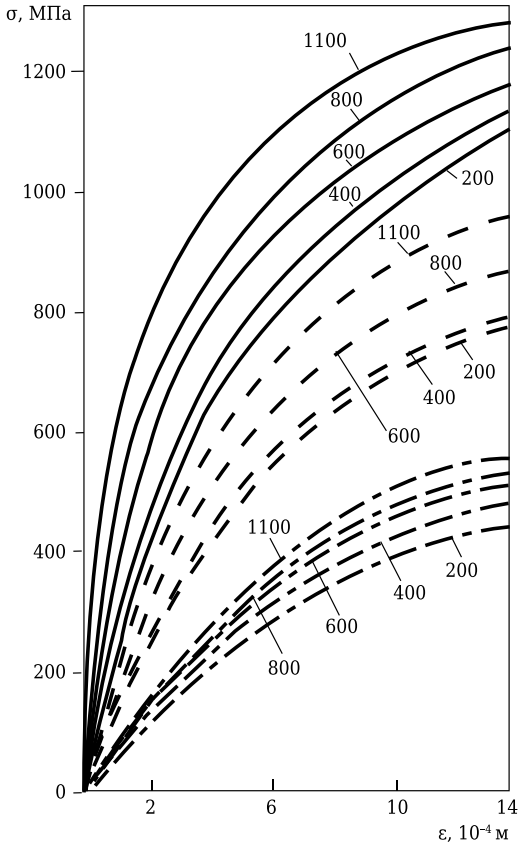

Рис. 2. Зависимость напряжения σ от деформации ε в периклазохромитовом огнеупоре ПХС до и после службы в вельц-печах при различных температурах (указаны на кривых, °С): - — - — - — огнеупор до службы; – – – — наименее измененная зона; ——— — рабочая и переходная зоны

а иногда к обрыву загрузочных пересыпных устройств.

Для увеличения стойкости футеровки необходимо было изучить поведение различных высокостойких огнеупорных изделий применительно к условиям службы во вращающихся печах, разработать составы и технологии изготовления специальных огнеупоров для вельц-печей, а также подобрать различные сочетания огнеупоров для футеровок и создать конструкции кладки для вельц-печей различных размеров. Были изучены свойства ряда огнеупоров, которые являются основополагающими при эксплуатации футеровки вращающихся печей (табл. 1).

Перспективными для уменьшения образования настылей являются огнеупоры ПХПП периклазохромитового состава из плавленого зерна, обладающие малой, в основном закрытой пористостью и высокой коррозионной стойкостью [1, 2] по сравнению с этими показателями традиционных спеченных огнеупоров периклазохромитового состава ПХС (см. рис. 2).

Поскольку огнеупоры обладают различными термостойкостью и способностью наращивать и удерживать настылеобразование, соотношение различных огнеупоров в футеровке следует подбирать в зависимости от температурного режима и скорости настылеобразования по длине реакционной зоны во время службы.

В первую очередь настылеобразование происходит в наиболее горячей подзоне реакционной зоны печи — с 15–20 по 45–50 м ввиду появления жидкой фазы. На этом участке следует устанавливать периклазохромитовые огнеупоры с плавленой тонкомолотой составляющей (ПХПП), обладающие меньшей смачиваемостью, повышенной шлакоустойчивостью к реагентам плавки. В результате происходит уменьшение объема настылей или они вообще не образуются.

Приведенные свойства огнеупоров ПХПП обусловлены наличием крупнокристаллических плавленых зерен в связке, размеры которых достигают 800–950 мкм, повышенным количеством прямых связей между зернами, число которых достигает 70 %, и пониженным содержанием силикатов в тонкомолотой составляющей (SiO_2 до 15 %, CaO до 2 %). В спеченных огнеупорах ПХС зерна достигают лишь размеров 50–80 мкм, количество силикатов составляет 5–10 % [3].

Плотная структура периклазохромитовых огнеупоров с плавленой тонкомолотой составляющей (ПХПП) и характер пор уменьшают смачиваемость их расплавом. Так, насыщенность переходной зоны огнеупоров марки ПХПП оксидами Fe_2O_3 и SiO_2 после службы в агрегатах 6–8 %, в аналогичной зоне огнеупоров магнезитохромитового состава марок МХЦ, ХМ и ПХС насыщенность этими оксидами 18–20 %. На первый начальный объем образования настыли влияет также толщина слоя огнеупора, насыщенного реагентами плавки. Обычно это толщина переходной и рабочей зон, размер которых зависит от смачиваемости и теплопроводности огнеупорного материала.

По границе переходной и наименее измененной зон при службе происходит скалывание

Таблица 1. **Свойства огнеупорных изделий**

Огнеупор	Открытая пористость, %	Предел прочности при сжатии, МПа	Термостойкость (1300–20 °С), водяные теплосмены	Температурный коэффициент линейного расширения, 10^{-6} °С$^{-1}$	Модуль упругости, 10^3 МПа	Износоустойчивость, г/см^2	Скорость износа огнеупора, 10^{-2} м/ч
ХП	20–23	25–26	3–5	6,9	19,3	0,36–0,68	0,029
МХС	21–22	26–28	3–5	8,9	17,2	0,38–0,51	0,015
ПХС	16–20	30–34	4–6	9,5	12,5	0,4–0,9	0,012
ХПТ	18–20	25–30	6–8	9,1	14,6	0,2–0,29	0,011
ПХПП	14–15	39–42	3–4	10,0	11,4	0,18–0,20	0,010
МПМ	14–17	50–60	1–2	12,1	46,2	0,44–0,48	0,031

меньшей склонностью к настылеобразованию, рационально уменьшить долю футеровки, выполненной из огнеупоров ПХС до соотношения 1 : 0,45. Такая футеровка позволяет уменьшить образование «криц» и таким образом обеспечить увеличение кампании вельц-печи.

Анализ данных табл. 1 и 2 показывает, что теплопроводность предложенных авторами огнеупорных изделий ПХПП меньше, чем у традиционно применяемых огнеупорных изделий ПХС. Поэтому потери тепловой энергии через футеровку и корпус вельц-печи сократятся, что приведет к экономии топлива, улучшит конструктивную прочность вельц-печи.

Нами также был разработан кладочный раствор СВС [4]. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) представляет собой физико-химический процесс синтеза материалов производственно-технического назначения (порошков, изделий, растворов и покрытий), основанный на экзотермическом взаимодействии двух или нескольких компонентов, протекающий в режиме горения. В настоящее время СВС можно рассматривать как самостоятельное крупное технологическое направление. При использовании СВС можно решать целый ряд задач, главными из которых являются применение кладочных растворов и проведение ремонтно-восстановительных работ (факельное торкретирование).

Разработанный кладочный раствор был испытан во вращающихся печах. Кладочный шов получился керамическим от рабочей поверхности до кожуха печи, а в шве, выполненном из традиционных огнеупорных материалов (шамотных, муллитовых и т. д.), керамическая часть составляла 20–30 % от протяженности шва.

Кладочный раствор, произведенный по СВС-технологии, обладает высокими термостойкостью, шлакоустойчивостью, абразивостойкостью, а также хорошими теплоизоляционными свойствами. Линейная скорость синтеза 2–3 мм/с, футеровка начинает проявлять требуемые свойства через 1–5 мин. Синтезированный СВС-материал кладочного шва имеет огнеупорность 1850–2100 °С, предел прочности при сжатии до 85 МПа, кажущуюся плотность 2,5–3,2 г/см^3 и ТКЛР $0{,}5\cdot10^{-7}$–$1{,}3\cdot10^{-7}$ град$^{-1}$. СВС-материалы в качестве кладочного раствора успешно прошли испытания на Усть-Каменогорском свинцово-цинковом комбинате.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были выявлены причины образования настылей, их объем. Проанализирован механизм движения настылей и создание аварийных ситуаций. Испытаны высокостойкие периклазохромитовые плавленые огнеупоры ПХПП. Исследована теплопроводность огнеупоров ПХС, ПХПП и др. Определена зона (ее размеры) применения огнеупоров ПХПП в футеровке вельц-печей в зависимости от перерабатываемой шихты. В качестве кладочного раствора предложено применить СВС-материалы.

Испытания показали, что при применении предложенной схемы футеровки в процессе работы вельц-печей не образуются настыли, уменьшается абразивный износ футеровки, снижается температура корпуса печей, что уменьшает энергозатраты вельц-процесса на 10–15 %.

Модернизированная футеровка была испытана в вельц-печах Усть-Каменогорского свинцово-цинкового комбината (г. Усть-Каменогорск) и Лениногорского полиметаллического комбината (г. Лениногорск). Стойкость футеровок увеличилась в 1,6–1,8 раза.

Библиографический список

1. ***Словиковский, В. В.*** Коррозионно-эрозионностойкие футеровки вращающихся печей / *В. В. Словиковский* // Новые огнеупоры. — 2008. — № 4. — С. 13–17.

Slovikovskii, V. V. Rotary kiln corrosion-erosion-resistant linings / *V. V. Slovikovskii* // Refractories and Industrial Ceramics. — 2008. — Vol. 49, № 2. — P. 99–102.

2. ***Словиковский, В. В.*** Периклазохромитовые огнеупоры из плавленых материалов / *В. В. Словиковский, В. Н. Ерошкина, Г. В. Кононенко* [и др.] // Огнеупоры. — 1985. — № 3. — С. 13–17.

3. **А. с. 1623353 СССР.** Футеровка вельц-печи большого диаметра / В. В. Словиковский, Н. Ф. Лебедев, Б. В. Пономарев [и др.]. — № 4296686 ; заявл. 17.08.87 ; опубл. 22.01.91, Бюл. № 3.

4. ***Словиковский, В. В.*** Эффективное применение СВС-материалов в футеровках тепловых агрегатов цветной металлургии / *В. В. Словиковский, А. В. Гуляева* // Новые огнеупоры. — 2012. — № 2. — С. 4–6.

Slovikovskii, V. V. Efficient use of SHS materials on high-temperature equipment in nonferrous metallurgy / *V. V. Slovikovskii, A. V. Gulyaeva* // Refractories and Industrial Ceramics. — 2012. — Vol. 53, № 1. — P. 1–3.■

Получено 19.11.16
© В. В. Словиковский, А. В. Гуляева, 2017 г.