

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

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

УДК 66.041.49.043.1.67

ЭФФЕКТИВНЫЕ ВЫСОКОСТОЙКИЕ ФУТЕРОВКИ ДЛЯ ВЕЛЬЦ-ПЕЧЕЙ

Проанализированы условия службы футеровки вельц-печей Челябинского электролитного цинкового завода и Усть-Каменогорского свинцово-цинкового комбината и выявлены основные причины износа огнеупоров. Для условий службы в футеровке вельц-печей наиболее стойкими являются огнеупоры марок ПХПП и ХПТ. Для повышения стойкости футеровки вельц-печей разработаны, испытаны и внедрены схемы кладки с применением хромитопериклазовых термостойких огнеупоров и разработанного высокотемпературного клея, осуществлена пропитка огнеупоров каменноугольным пеком, изготовлена опытная партия изделий, которая была испытана в кладке вельц-печи. Разработан кладочный раствор на основе самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Исследованы пространственные геометрические формы, оптимальные размеры, конструкции керамических изделий и кладок на их основе. Кладки испытаны в вельц-печах ряда предприятий.

Ключевые слова: скалывание огнеупорных изделий, термические напряжения, хромитопериклазовые термостойкие огнеупоры, огнеупоры на основе плавленного зерна периклазохромитового состава, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, кладочный раствор.

Для извлечения цинка из отходов производства, содержащих цинк в окисленной и частично в сульфидной форме, применяется вельцевание. Это процесс отгонки ценных компонентов во вращающейся печи при нагреве исходного материала до температуры ниже температуры его плавления. Основным сырьем служат кеки и шлаки, иногда дополнительно вводятся пыли и цинковые руды. В качестве восстановителя используются коксик в количестве до 50 мас. % шихты.

Вельцевание производится в трубчатых печах длиной 40–90 и диаметром 2,5–5 м. В Российской Федерации в основном используются печи размерами 3,6×50 м (большие) и 2,5×41 м (малые). Корпус печи, как правило, поддерживается двумя или тремя роликовыми опорами.

За рубежом эксплуатируются различные типы вельц-печей. Так, в Народной Республике Болгарии используют двухпорные печи размерами 2,5×41 м, в Польше на металлургическом заводе в Мясечке-Шленском применяют пятиопорные вельц-печи диаметром 4,2 и длиной 95 м, на заводах в Болеславе — длиной 40 и диаметром 3 м.

Фирма «Jndusfueaukagen humbolt Wadag» построила в Замбии вельц-комплекс по извлечению цинка и свинца из отвальных пород. В комплекс входят две вращающиеся печи длиной 75 и диа-

метром 4,5 м и одна печь размером 3,2×40 м. Самые малые печи в Японии: их длина 30–38 и диаметр 2,0–2,5 м.

Из практики работы крупногабаритных вельц-печей известно, что длительность кампании зависит от многих факторов. Основные из них:

- переменная влажность исходного материала;
- непостоянство состава исходного материала;
- непостоянство технологического режима;
- степень агрессивности среды;
- стойкость огнеупоров.

Также установлено, что стойкость футеровки двухпорных печей ниже, чем у трехпорных. Это объясняется наличием изгибающих моментов, которые у двухпорных печей в несколько раз меньше, чем на крайних опорах трехпорной печи. Искривление геометрической оси печи вызывает действие циклических нагрузок на футеровку и ее разрушение.

Огнеупорная футеровка в вельц-печах наряду с термическими ударами испытывает постоянное химическое и механическое воздействие перерабатываемой шихты и продуктов вельцевания. Последние присутствуют в различных фазовых состояниях: твердых (клинкер, кокс), жидких (железисто-силикатный расплав, штейн) и газообразных (CO, CO₂, O₂, SO₂, SO₃, пары цинка и свинца). Степень воздействия этих продуктов на футеровку печи определяет характер и величину износа огнеупорного материала.

Проанализированы условия службы футеровки вельц-печей Челябинского электролитного цинкового завода и Усть-Каменогорского



А. В. Гуляева
E-mail: gulaevaanna@bk.ru

свинцово-цинкового комбината. В результате выявлены основные причины разрушения огнеупоров в вельц-печах: реакционное воздействие химически активных соединений, проникающих в огнеупор из силикатного расплава шихты при высоких температурах; миграция и перераспределение железа в огнеупоре с образованием магнезиоферрита и силикатов; механическое воздействие перекачиваемой шихты на ослабленную реакционную зону. Установлено, что основная причина малой стойкости огнеупора — воздействие кислого железокальциевосиликатного расплава на шпинель-форстеритовую связку огнеупора. Если сравнить температуры плавления шпинели $MgAl_2O_4$ (2135 °C) и форстерита (1890 °C) с температурой эвтектики в системе $MgO - Fe_2O_3 - SiO_2$, то становится очевидным влияние железа на стойкость огнеупора.

Присутствие CaO в силикатной части расплава еще более снижает температуру плавления минеральных фаз огнеупора (система $Ca-Fe$ — оливит в растворе с фаялитом образуют эвтектику при 1050 °C). Кроме того, за счет внедрения кислого расплава вместо части ортосиликатов в связке (форстерита) происходит образование пироксенов, имеющих температуру плавления на 300–400 °C ниже.

Наибольшей химической стойкостью обладают зерна хромита, но и в них вследствие образования магнетита с высоким температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР) наблюдается трещиноватость, приводящая к разрушению.

Также установлено, что рудные компоненты шихты, кроме железа, проникают в огнеупор на незначительную глубину и не оказывают существенного влияния на стойкость хромомagneзита в реакционной зоне.

При воздействии шлаков системы $Fe_2O_3 - CaO - SiO_2$ на шпинелиднопериклазовые огнеупоры механизм износа зависит от основности шлака, тогда как степень износа — от состава шпинелидной части связки огнеупора. Преимущество отдается высокоглиноземистым шпинелидам, сохраняющим объемостоянство под воздействием оксидов железа основного состава. В случае воздействия кислых шлаков следует использовать композиции периклаза и высокохромистых шпинелидов при возможно большем содержании $MgCr_2O_4$.

Воздействие серы (в газовой среде) на периклаз происходит по реакциям:



Реакции идут с образованием легкорастворимого соединения — сульфата магния, причем решетка периклаза при этом разрушается. Установлено, что сернистый газ снижает стой-

кость магнезиальных огнеупоров, практически не взаимодействуя с хромшпинелидом.

В магнезитохромитовых огнеупорах, граничащих с газовым пространством, образуется рыхлая зона. Это объясняется тем, что при каталитическом взаимодействии цинка и железа из оксида углерода, насытившего огнеупор, выделяется сажистый углерод. Давление, развиваемое при кристаллизации металлического цинка и сажистого углерода, разрушает структурные связи между агрегатами периклаза и хромшпинелида. Это — одна из основных причин, приводящих к растрескиванию огнеупора. Указанный процесс в основном развит не в рабочей зоне изделия, а в его глубине, где температурные условия способствуют конденсации. В то же время динасовые изделия показали более высокую стойкость в газовом пространстве, хотя их насыщение цинком достигает 20 %; при этом происходит образование виллемита и стекла.

Для обеспечения прироста выпуска цинка в условиях возрастания в переработке доли все более бедных руд и концентратов и ухудшения качества цинксодержащих шлаков необходимо увеличение межремонтной кампании печей вельцевания, а значит, повышение стойкости футеровки.

В числе ряда мероприятий для повышения химической и конструкционной прочности огнеупорной футеровки вельц-печей был разработан и испытан огнеупорный клей с высокими показателями эксплуатационных свойств [1]. Применение клея уменьшает температурные напряжения в кладке (рис. 1). Физико-механические показатели клея приведены ниже:

Огнеупорность, °C, не ниже.....	1770
Термостойкость, число воздушных тепломсмен, не менее.....	24
Прочность при сдвиге, МПа, не менее.....	6,5
Растекаемость, мм, не менее.....	70–90
Осадка конуса, см, не менее.....	11
Линейная усадка, %.....	0–1
Кажущаяся плотность, г/см ³ , не менее.....	2,2
Открытая пористость, %, не более.....	27
Предел прочности при сжатии, МПа, не менее.....	35

Были исследованы свойства огнеупорных изделий магнезиального состава в широком диапазоне. Наиболее стойкими огнеупорами признаны огнеупоры марок ПХПП и ХПТ. Также была разработана комбинированная схема кладки (ленточная) с использованием высокостойких огнеупоров и огнеупорного клея (рис. 2). Такая конструкция кладки позволяет увеличить стойкость футеровки за счет создания каркаса из высокостойких огнеупоров марки ПХПП.

В реакционной зоне вельц-печей предложено испытать огнеупоры, пропитанные камен-

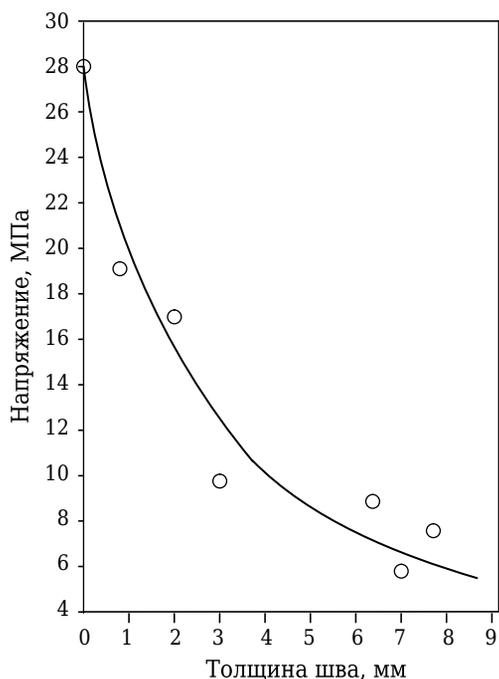


Рис. 1. Зависимость величины температурных напряжений, возникающих в огнеупорной кладке, от толщины швов

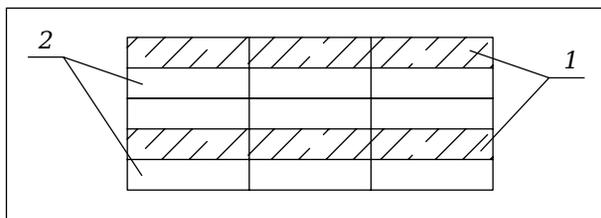


Рис. 2. Схема «ленточной» кладки футеровки вельц-печи: 1 — огнеупоры марки ХПТ; 2 — марки ПХПП

ноугольным пеком. Такие огнеупоры обладают улучшенными показателями физико-химических свойств вследствие наличия углеродной составляющей (см. таблицу).

Свойства периклазохромитовых огнеупоров, пропитанных каменноугольным пеком*

Образец	Кажущаяся плотность, г/см ³	Открытая пористость, %	Предел прочности при сжатии, МПа	Термостойкость, теплосмены (1300 °С – вода)
1	3,08	2,69	106,8	10
2	3,08	2,75	76,2	9
3	3,09	2,63	68,1	8
4	3,10	2,35	116,8	8
Среднее	3,09	2,65	91,9	9

* Шлакоустойчивость 1,96 %.

Пропитанные пеком огнеупоры имеют высокую стойкость к коррозии шлаками и абразивному износу, повышенную термостойкость, обеспечивающую прочность огнеупоров при периодическом режиме работы. Стойкость к коррозии обеспечивается несмачиваемостью углерода шлаками. Добавка углерода уменьшает зону пропитки огнеупоров шлаками и, следовательно, замедляет процесс коррозии. Абразивная стойкость обеспечивается фрикционными свойствами графита. Для заполнения швов кладки была разработана огнеупорная масса, содержащая хромитовую руду, железную окалину, алюминий, сульфат магния и воду. Масса, разработанная для получения кладочного раствора методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), обеспечивает равномерную прочность по всему объему футеровки за счет повышения стабильности физико-химических преобразований и взаимодействия со швами футеровки в процессе горения при сохранении температуры нагрева 300–450 °С [2].

Разработанный кладочный раствор прошел испытания в вельц-печах. Кладочный шов получался керамическим от рабочей поверхности до кожуха печи, а в шве, выполненном из традиционных огнеупорных материалов (шамотные, муллитовые и т. д.), керамическая часть составляла 20–30 % от протяженности шва.

Кладочный раствор, произведенный по СВС-технологии, обладает высокими термостойкостью, шлакоустойчивостью, абразивной стойкостью, хорошими теплоизоляционными свойствами. СВС проводится при разогреве. Линейная скорость синтеза 2–3 мм/с, футеровка начинает проявлять требуемые свойства через 1–5 мин. Огнеупорность синтезированного СВС-материала кладочного шва 1850–2100 °С, предел прочности при сжатии 50–60 МПа. СВС-материалы успешно прошли испытания в качестве кладочного раствора в вельц-печах на Усть-Каменогорском свинцово-цинковом комбинате.

В настоящее время время кладка футеровки вельц-печей часто ведется с расклиниванием металлическими пластинами для уменьшения вероятности выпадения огнеупорных изделий при эксплуатации. Применение металлических пластин вызывает дополнительные термические напряжения в кладке, химический износ, особенно в рабочем окате из-за высокого ТКЛР металла пластин, и образование легкоплавких соединений типа магнезиоферрита с футеровкой на границе огнеупор – шихта. При этом происходят объемные изменения, в результате чего может произойти скалывание огнеупора на толщину до 80 мм при пуске или останове вращающейся печи. Использование шамотного мертеля в зоне подготовки печи часто приводит к разрушению шва из-за малой механической прочности и большой усадки при температуре процесса, что ведет к открытию шва.

Для устранения этих недостатков была разработана конструкция специального изделия (рис. 3), позволяющая за счет рассчитанной формы снизить термические напряжения в футеровке. Специальный зацеп на изделии резко уменьшает вероятность его выпадения из окатов во время эксплуатации печи, исключает использование металлических пластин при кладке. Поскольку в одном изделии сосуществуют рабочий и теплоизоляционный слой, резко снижаются теплотери через кладку. Теплоизоляционный слой состоит из огнеупорного материала и искусственных пор, которые образуются при прессовании изделий. Потери тепла через футеровку уменьшает также паз для закладки дополнительной теплоизоляции: каолиновой ваты, асбестового волокна и др.

При разработке конструкции изделия учитывали распределение термонапряжений по его сечению при температуре службы, затем рассчитывали оптимальные размеры, количество и размер искусственных пор с целью уменьшения теплопроводности изделия без потери необходимой механической прочности. Для получения пор

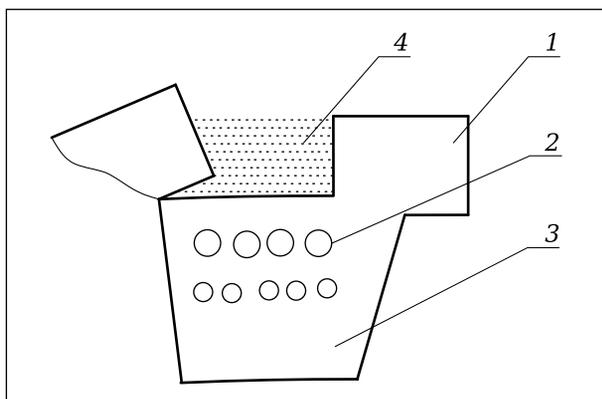


Рис. 3. Специальное огнеупорное изделие: 1 — зацеп; 2 — искусственные поры; 3 — рабочая зона огнеупорного изделия; 4 — теплоизоляционная засыпка из волокнистого материала: каолиновой ваты, асбестового волокна и др.

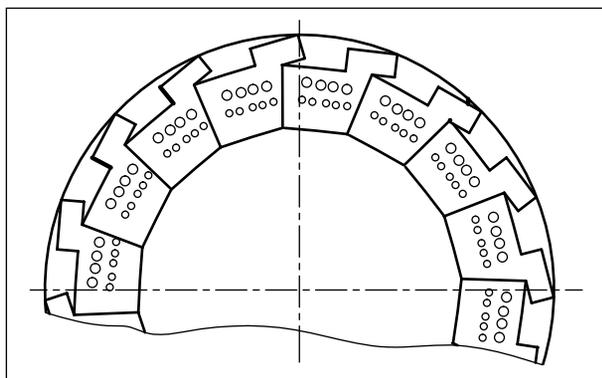


Рис. 4. Схема кладки футеровки вельц-печи из специальных огнеупорных изделий

использовали шарообразный пенопласт, который выгорает при службе изделия (см. рис. 3). Схема кладки представлена на рис. 4 [3].

Специальные изделия были испытаны в своде мартеновских печей Нижнетагильского металлургического комбината и Нижнесергинского метизно-металлургического завода. Применение разработанных изделий позволило увеличить стойкость футеровки на 40–60 %.

Изделия разработанной конструкции позволяют отказаться от расклинивания кладки, уменьшить толщину футеровки вращающихся печей до 30 % от применяемой обычно и тем самым уменьшить массу кладки и, следовательно, расход дорогостоящих огнеупорных материалов; применение изделий снижает расход энергоносителей, термические напряжения в кладке и тем самым уменьшает скалывание огнеупоров при службе. Практически исключается выпадение элементов кладки при эксплуатации. Обожженные изделия целесообразно использовать в реакционной зоне вращающихся печей. Изделия прошли испытания в футеровке вращающихся печей Карагандинского металлургического и Ачинского глиноземного комбинатов. Стойкость футеровки увеличилась на 40–50 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализированы условия службы футеровки промышленных вельц-печей и выявлены основные причины износа огнеупоров. Преобладающим механизмом износа огнеупоров в вельц-печах является химическое взаимодействие огнеупора с компонентами шихты и последующий абразивный износ. Для условий службы в футеровке вельц-печей наиболее стойкими являются огнеупоры марок ПХПП и ХПТ.

Для повышения стойкости футеровки вельц-печей разработаны, испытаны и внедрены схемы кладки с применением хромитопериклазовых термостойких огнеупоров и огнеупорного высокотемпературного клея. Применение ленточной схемы кладки с использованием огнеупоров марок ХПТ и ПХПП позволило увеличить стойкость футеровки вельц-печей. С целью увеличения стойкости футеровки была осуществлена пропитка огнеупоров каменноугольным пеком, изготовлена опытная партия изделий, которая была испытана в кладке вельц-печи.

Разработан кладочный раствор, для производства которого использован процесс СВС, позволяющий получить керамический шов с улучшенными физико-химическими свойствами по всей глубине футеровки.

Исследованы пространственные геометрические формы, оптимальные размеры, конструкции керамических изделий и кладок на их основе. Кладки испытаны в вельц-печах ряда предприятий цветной и черной металлургии.

Таким образом, вышеприведенные мероприятия позволили повысить стойкость футеровок вельц-печей ряда предприятий в 1,5–2,0 раза без существенного увеличения затрат на ремонт футеровок тепловых агрегатов.

Библиографический список

1. **Словиковский, В. В.** Высокотемпературный клей в футеровках тепловых агрегатов цветной металлургии / В. В. Словиковский, В. М. Корнеев, Ю. И. Рожин // И.Л. ЦНТИ (г. Свердловск). — 1989. — № 89. — С. 47.
2. **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.

3. **Словиковский, В. В.** Кладка футеровок высокотемпературных металлургических агрегатов из специальных огнеупорных изделий / В. В. Словиковский // Новые огнеупоры. — 2010. — № 8. — С. 7–9.

Slovikovskii, V. V. Brickwork of furnace lining of high-temperature metallurgical plants produced from special refractory materials / V. V. Slovikovskii // Refractories and Industrial Ceramics. — 2010. — Vol. 51, № 4. — P. 233–235. ■

Получено 06.06.14
© В. В. Словиковский,
А. В. Гуляева, 2014 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



Ассоциация сталеплавателей, ОАО ТМК,
ОАО «Северский трубный завод», ЦНИИчермет проводят

XIII МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОНГРЕСС СТАЛЕПЛАВИЛЬЩИКОВ ПОД ДЕВИЗОМ: «СТАЛЬ: ОТВЕТ ТРЕБОВАНИЯМ ВРЕМЕНИ»



Конгресс будет проходить в г. Полевской Свердловской обл. в год 275-летия Северского трубного завода — одного из крупнейших в России производителей труб и 70-летия ФГУП «ЦНИИчермет им. И. П. Бардина».

Оргкомитет:

Адрес: 623388, г. Полевской, ул. Вершинина, 7. Факс: 8-34350-33706. E-mail: StepanovAl@stw.ru

Подробная информация о проведении конгресса сталеплавателей размещена на сайтах: www.steelcongress.ru, www.tmkgroup.ru