

УДК 666.762.32-484.2.017:620.178.16

ОПТИМАЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ ФАКЕЛЬНОГО ТОРКРЕТИРОВАНИЯ И ЭФФЕКТИВНЫЕ ТОРКРЕТ-МАССЫ ДЛЯ ГОРЯЧЕГО РЕМОНТА АГРЕГАТОВ ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Исследованы процесс факельного торкретирования и применяемые торкрет-массы в черной металлургии. Проведены исследования, направленные на повышение стойкости футеровки агрегатов цветной металлургии с помощью ремонта футеровки без остановки агрегатов методом факельного торкретирования. Разработана специальная торкрет-масса с учетом специфических условий службы футеровки данных агрегатов. Установлено, что для понижения температуры необходимо вводить в торкрет-массу легкоплавкий компонент или термитную смесь, работающую по принципу самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Создана конструкция торкрет-установки с учетом свойств торкрет-масс. Испытания новых торкрет-установок, торкрет-масс на комбинатах цветной металлургии показали увеличение стойкости футеровок в 1,8–2,5 раза.

Ключевые слова: термостойкость, горячий ремонт, факельное торкретирование, периклазохромит, кварцит, самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС).

К мерам по повышению стойкости футеровки металлургических агрегатов относят создание технологий высокостойких огнеупоров (плавнелитых, термостойких и др.), разработку пространственных форм огнеупоров, сокращающих количество швов в футеровке, а также применение изделий с регулируемой пористостью. Применение различных защитных покрытий (на основе фосфатных связок, коксика), пропитка изделий шлако-штейновыми или металлическими расплавами, угольным пеком. Все эти меры требуют полной остановки агрегатов, что вызывает деформацию футеровки из-за температурного скачка и большие затраты на проведение ремонтных работ.

Малозатратным процессом восстановления футеровки, особенно ее локальных участков, является торкретирование. В черной металлургии применяется мокрое (торкрет-масса влажностью до 20 %), сухое (влажность массы менее 10 %) и горячее (факельное) торкретирование. Два первых способа включают необходимость остужать футеровку до 100 °С и большую потерю массы при нанесении. Эти недостатки исключены при факельном торкретировании.



А. В. Гуляева

E-mail: a.gulyaewa2012@yandex.ru

При нанесении торкрет-покрытия огнеупорный порошок подается в высокотемпературный факел, в котором за короткий промежуток времени (ограниченный длиной факела и расстоянием от торкрет-фурмы до футеровки теплового агрегата, разогретой до температуры выше 1500 °С) частично или полностью расплавляется и в пластичном состоянии с большой скоростью внедряется в футеровку. Толщина торкрет-покрытия определяется высотой локального износа футеровки или временем торкретирования. Процессы формирования торкрет-покрытия должны проходить быстро, так как горячий ремонт футеровки ограничен во времени и составляет 15–20 мин. Расплавление частиц происходит за доли секунды, поэтому необходимо, чтобы они имели размеры менее 90 мкм, а температура в факеле была выше 2000 °С. Когда частицы уже находятся непосредственно в покрытии, на них еще некоторое время воздействуют факел и другие раскаленные частицы. Пока торкрет-покрытие остывает до температуры рабочей поверхности футеровки, в нем протекают процессы минералообразования, фазовые переходы и спекание, которые идут в жидкой фазе или в ее присутствии.

Медеплавильные конвертеры характеризуются относительно невысокой температурой процесса — около 1300–1250 °С, а температура рабочей поверхности футеровки после слива шлака и черновой меди еще ниже — 1200–1100 °С. Кроме того,

поверхность футеровки покрыта слоем шлака и магнетитового гарнисажа ($\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) толщиной до 20–30 мм, что вносит дополнительные сложности в процессе торкретирования. Футеровка выполняется огнеупорами ПХС (периклазохромитовыми), ХПТ (хромитопериклазовыми термостойкими) и ХП (хромитопериклазовыми), основная фаза которых — периклаз, а следовательно, и торкрет-масса для ремонта футеровки должна быть на основе периклаза. Чистый периклаз имеет очень высокую температуру плавления (2825 °С), поэтому в торкрет-массу помимо MgO нужно вводить компоненты, снижающие температуру образования жидкой фазы. Эти компоненты должны отвечать следующим требованиям: температура плавления 1600 °С, способность растворения в MgO , температура плавления продуктов растворения спекающегося компонента в MgO выше 1700 °С и отсутствие их разрушения при охлаждении покрытия, высокая скорость растворения спекающегося компонента, его низкая стоимость и отсутствие дефицита. Интенсивность спекания при заданном вещественном составе торкрет-порошка зависит от температуры поверхности. При торкретировании она должна быть не ниже температуры начала деформации данной торкрет-массы. Поэтому перед торкретированием поверхность футеровки медеплавильных конвертеров необходимо нагревать выше 1500 °С, что усложняет процесс и ведет к дополнительным затратам энергии. Кроме того, разогрев поверхности необходим, чтобы удалить гарнисаж и слой шлака с футеровки.

В газовую струю подают одновременно топливо (твердое, жидкое или газообразное), воздух, обогащенный кислородом, и огнеупорный порошок. В зависимости от вида топлива различают жидкостное факельное торкретирование (топливом служит керосин), газовое (топливо — природный газ) и твердоугольное (топливо — угольная пыль). При горении топлива образуется факел. При факельном торкретировании в кислородной струе природного газа или керосина торкрет-порошок образует на поверхности прочный и плотный слой (можно получить слой пористостью примерно 3 %). Однако такой слой часто оказывается нетермостойким, трескается и даже частично отслаивается. При введении в факел 20–30 % коксовой пыли торкрет-слой получается пористым, более термостойким, при этом менее прочным, поскольку кокс не успевает сгореть за время полета частиц от среза торкрет-фурмы до стенки и процесс горения продолжается в торкрет-слое. На месте сгоревших частиц кокса остаются поры. Пористость торкрет-слоя в начальный момент зависит от того, какая часть топлива сгорает в факеле, а какая в торкрет-слое, далее происходят процессы спекания, обуславливающие понижение пористости и повышение прочности.

Внедрение технологии факельного торкретирования на заводах черной металлургии позволило сократить время ремонта тепловых агрегатов, увеличить коэффициент их использования, уменьшить долю ручного труда и расход изделий. В цветной металлургии факельное торкретирование в широком масштабе не применяется. Попытки применения факельного торкретирования фурменного пояса конвертеров были проведены на ПАО «Комбинат Южуралникель» и Усть-Каменогорском металлургическом комплексе, но они не дали положительных результатов из-за низкой стойкости получавшегося торкрет-слоя. В то же время из зарубежной практики известно, что технология факельного торкретирования внедрена на заводе Corpet Cliff фирмы INCO Metals (Канада) для ремонта футеровки вращающихся конвертеров с верхней продувкой для плавки медно-никелевых и сульфидных материалов. В результате стойкость футеровки увеличилась с 25 до 34–36 сут и снижился расход огнеупоров.

Факторами, сдерживающими применение факельного торкретирования агрегатов медно-никелевого производства, являются наличие на футеровке шлако-штейнового гарнисажа, относительно низкая температура технологического процесса, высокая температура плавления торкрет-масс, используемых при факельном торкретировании в агрегатах черной металлургии, а также конструктивные особенности агрегатов со сложным допуском к месту износа футеровки, наличие многочисленных технологических отверстий (фурмы конвертеров). По этим причинам для агрегатов цветной металлургии прямой перенос опыта черной металлургии неприемлем. Проведены исследования по разработке технологии факельного торкретирования применительно к тепловым агрегатам медно-никелевой подотрасли, в которых идет резко дифференцированный износ футеровки: конвертерам, где фурменный пояс выгорает в 3–4 раза быстрее остальной футеровки; руднотермическим печам, где шлаковый пояс выгорает в 2–3 раза быстрее остальной футеровки; своды электропечей в области электродных отверстий.

Исследовательские работы проводили в двух направлениях: нанесение высокотемпературной торкрет-массы (температура плавления 2300 °С) с предварительным разогревом футеровки с полным оплавлением гарнисажа и удалением шлаков из пропитанной части огнеупоров; частичное оплавление гарнисажа при 1200–1300 °С и нанесение торкрет-массы с введением легкоплавких добавок, химически однородных с пропитанной частью футеровки, имеющих температуру плавления 1400–1500 °С. Лабораторные испытания, проведенные на опытном стенде ООО «Институт Гипроникель», показали, что при нагревании огнеупора от 1000 (температу-

ра слива металла в агрегатах цветной металлургии) до 1800 °С (температура, необходимая для спекания высокотемпературной торкрет-массы) наблюдалось разрушение огнеупора из-за возникновения термонапряжений, а при нанесении высокотемпературной торкрет-массы на огнеупор с температурой 1000–1200 °С наблюдалось ее отслаивание ввиду разности ТКЛР огнеупора и торкрет-массы. Следовательно, были продолжены работы в направлении применения торкрет-массы с легкоплавкими добавками и предварительным нагревом футеровки до 1500–1550 °С, при котором гарнисаж с поверх-

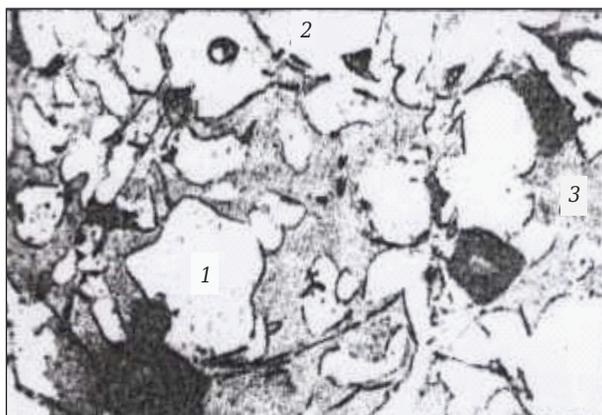


Рис. 1. Микроструктура рабочей зоны огнеупора: 1 — зерна MgO; 2 — зерна хромомagnesита; 3 — силикаты; черное — поры



Рис. 2. Микроструктура контакта огнеупора ПХС с торкрет-покрытием: 1 — огнеупор; 2 — торкрет-покрытие; черное — поры

Таблица 1. Составы торкрет-массы, мас. %, образцов

Компоненты	1	2	3
Пековый кокс	20	22	25
Кварцит	30	25	20
Хромитомagnesит	50	53	55

Таблица 2. Свойства покрытий из образцов торкрет-масс

Состав	Предел прочности при изгибе, МПа	Прочность на скалывание, МПа	Температура спекания, °С	Время торкретирования, с	Расход торкрет-массы, г/с
1	8,5	3,65	1400	30	50
2	9,8	4,11	1500	22	40
3	9,3	3,63	1400	25	45

ности футеровки сплавляется, переходная зона размягчается перед нанесением торкрет-массы. Ее частицы непосредственно внедряются в размягченную переходную зону с образованием покрытия.

С целью уменьшения температуры спекания торкрет-покрытия, снижения расхода торкрет-массы, повышения предела прочности покрытия при изгибе и скалывании в торкрет-массу, включающую огнеупорный материал и углеродосодержащий компонент, дополнительно вводили кварцит (SiO₂). Данная торкрет-масса испытана на огневом стенде ООО «Институт Гипроникель» и опытном заводе ОАО «Унипромедь». Образцы периклазохромитовых огнеупоров, пропитанные шлаком и покрытые гарнисажом толщиной 10–30 мм, были отобраны из надфурменной зоны медного конвертера. В шлаке, кроме минералов (фаялита, магнетита, гематита, монтичеллита, энстатита и стекла), содержались зерна и агрегаты периклаза и хромшпинелида.

Образцы разогревали газокислородным факелом (>1700 °С) до 1500–1550 °С. Контроль температуры проводили оптическим пирометром. При этом шлак и гарнисаж частично оплавились с поверхности и стекали. Далее на поверхность образцов через фурму подавали торкрет-массу, затем образцы медленно охлаждали. Химический состав торкрет-покрытия, мас. %: SiO₂ 14,3, Al₂O₃ 4,54, Cr₂O₃ 13,9, FeO 1,02, Fe₂O₃ 13,07, CaO 18,5, MgO 48,37 [1, 2]. Петрографический анализ участка образца показал образование плотной зоны, в которой микроскопически трудно выделить границу между огнеупором и торкрет-слоем (рис. 1, 2).

Торкрет-покрытие на основе периклазохромитового порошка, кварцита и коксика, нанесенное методом факельного торкретирования имеет следующие характеристики: пористость 18–25 %, кажущаяся плотность 2,4–2,6 г/см³, предел прочности при сжатии 30–40 МПа, рабочая температура 1300–1400 °С. Составы торкрет-массы приведены в табл. 1, свойства покрытий, полученных из этих составов, приведены в табл. 2. Оптимальным составом является состав 2. Использование предлагаемой торкрет-массы в медно-никелевом производстве обеспечило увеличение стойкости футеровки агрегатов на 15–20 % и снижение расхода торкрет-массы на 20–30 % на один тепловой агрегат.

Для дальнейшего эффективного использования процесса факельного торкретирования для

ремонта футеровок агрегатов медно-никелевого производства предложено в качестве компонента использовать термосмеси, работающие по принципу самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [3, 4]. Испытывали два вида масс: на основе магнезитового металлургического порошка и на основе шихты периклазохромитовых изделий. Зерновой состав магнезильного порошка по фракциям, %: 3–1 мм 27, 1,0–0,5 мм 47, мельче 0,5 мм 32. Зерновой состав периклазового порошка, %: 3–1 мм 37, 1,0–0,5 мм 25, мельче 0,5 мм 35. Термитную смесь готовили из тонкомолотой окалины (проход через сито с размером ячейки 0,088 мм — 100 %) и порошка металлического алюминия марки АПЖ. Состав термитной смеси рассчитывался исходя из реакции $Fe_2O_3 + 2Al \rightleftharpoons 2Fe + Al_2O_3$. Соотношение окалины и алюминия по данному уравнению составляет $Fe_2O_3 : Al = 80 : 27$. Торкрет-массы с термитной смесью имеют меньшее время расплавления частиц в факеле за счет экзотермической реакции, которая протекает и после попадания торкрет-массы на футеровку, что улучшает процесс спекания [5–7].

Вследствие малого времени пребывания частиц торкрет-массы в факеле часть термитной смеси не успевает прореагировать, поэтому, попадая на футеровку, взаимодействует с ней, образуя тугоплавкие соединения в виде магнезиоферрита ($MgFe_2O_4$) и сложного шпинелида $Mg(C_2, Al, Fe)_2O_4$. В результате образования вышеуказанных соединений как в футеровке, так и в торкрет-покрытиях получено прочное химическое сцепление между ними в виде единого монолита с большим количеством прямых связей между зернами покрытия и футеровки (рис. 3). Характеристика торкрет-покрытия на основе огнеупорного порошка, термитной смеси и коксика, нанесенного методом факельного торкретирования: пористость 3,1–3,3 г/см³, рабочая температура 1300–1500 °С, предел прочности при сжатии 35–50 МПа.

Разработана конструкция факельного торкретирования для «горячего» ремонта футеровок горнов шахтной печи ЗАО «Режникель» (рис. 4), электропечей и конвертеров ОАО «Уфалейникель». Установка производительностью 1800–2000 кг/ч успешно прошла испытания по оплавлению шлака и гарнисажа с поверхности футеровки и нанесению торкрет-масс на футеровку фурменного пояса горизонтальных конвертеров, шлакового пояса электропечей предпочтительней.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлена возможность применения факельного торкретирования для ремонта футеровки агрегатов цветной металлургии. Метод факель-

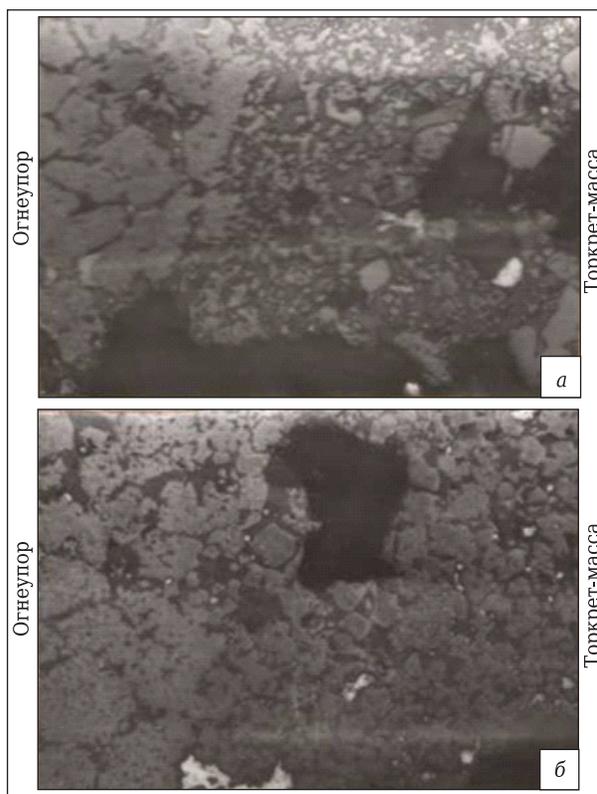


Рис. 3. Зона контакта огнеупор – торкрет-масса. Состав торкрет-массы: а — 40 % термитной смеси, 60 % периклазохромитовой массы; б — 50 % термитной смеси, 50 % периклазохромитовой массы

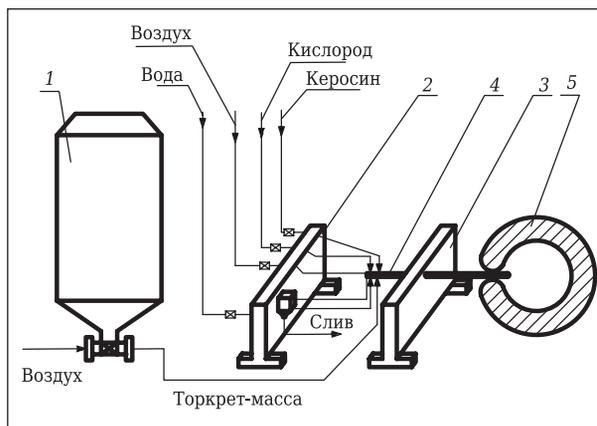


Рис. 4. Лабораторная торкрет-установка: 1 — бункер-питатель торкрет-массы; 2 — узел управления; 3 — защитный экран с механизмом перемещения фурмы; 4 — торкрет-фурма; 5 — конвертер

ного торкретирования более целесообразен для использования в медно-никелевых конвертерах (вертикальных, горизонтальных), отражательных медеаффинировочных печах, рудно-термических печах. В связи с большим объемом шлаков фаялитового состава и относительно низкой температурой процесса необходимо перед проведением факельного торкретирова-

ния агрегатов производить удаление гарнисажа высокотемпературным факелом. Показано, что для агрегатов цветной металлургии возможно создание торкрет-покрытия при введении в торкрет-массу легкоплавких добавок, образующих огнеупорные фазы (форстерит, монтичеллит). Разработаны и испытаны специальные торкрет-массы, обеспечивающие химическое сцепление футеровки и торкрет-массы на основе термитных смесей при относительно низкой температуре службы футеровки.

Разработаны составы СВС-материалов для производства кладочного раствора, торкрет-массы для факельного торкретирования и технологии их изготовления и применения, а также лабораторная и полупромышленная торкрет-установки. СВС-материалы прошли испытания в футеровках тепловых агрегатов ЗАО «Режникель», ОАО «Уфалейникель» и Усть-Каменогорского металлургического комплекса

Библиографический список

1. А. с. 1694548 СССР. Торкрет-масса / В. В. Словиковский, В. М. Гомоюнов. — № 4153462 ; заявл. 13.11.86 ; опубл. 01.09.91, Бюл. № 30.
2. Словиковский В. В. Процесс факельного торкретирования для восстановления и защиты футеровок агрегатов медно-никелевого производства / В. В. Словиковский, В. М. Гомоюнов, Ю. И. Рожин // Огнеупоры. — 1989. — № 11. — С. 25–28.
3. Левашов, Е. А. Физико-химические и технологические основы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / Е. А. Левашов [и др.] — М. : Бинум, 1999. — 176 с.
4. Владимиров, В. С. Технологические приемы повышения эффективности футеровок тепловых агрегатов в металлургии / В. С. Владимиров, М. А. Илюхин, И. А. Карлукхин [и др.] // По всей стране. — 2003. — № 3. — С. 5–8.
5. Пат. 2001035 Российская Федерация. Огнеупорная масса для изготовления огнеупорных изделий / Чи-

и показали высокие физико-химические свойства. Увеличение стойкости футеровок составило 2,0–2,5 раза. Факельное торкретирование может быть успешно применено при горячих ремонтах футеровки порогов, локальных участков вращающихся печей цементной промышленности и охлаждения агрегата, а также вельц-печей металлургических предприятий, фурменной зоны горизонтальных конвертеров и шлаковых поясов электропечей. Внедрение факельного торкретирования при горячих ремонтах футеровок агрегатов цветной металлургии позволит сэкономить до 100 тыс. т/год дорогостоящих изделий, увеличить коэффициент использования агрегатов в 1,5–2,0 раза, сократить расходы электроэнергии, идущей на разогрев агрегата при пуске после ремонта, сократить ручной труд, уменьшить потери цветных металлов при замене футеровок, вследствие уменьшения количества ремонтов.

стополова Н. Н., Лялин В. К., Гладышева М. С., Игошев А. В. Словиковский В. В. — № 4948394 ; заявл. 24.06.91 ; опубл. 15.10.93, Бюл. № 29.

6. Словиковский, В. В. Эффективные торкрет-массы для факельного торкретирования агрегатов цветной металлургии / В. В. Словиковский // Цветные металлы. — 2005. — № 11. — С. 44–46.

7. Словиковский, В. В. Эффективное применение СВС-материалов в футеровках тепловых агрегатов цветной металлургии / В. В. Словиковский, А. В. Гуляева // Новые огнеупоры. — 2012. — № 2. — С. 4–7.

Slovikovskii, V. V. Efficient use of SHS materials on high-temperature equipment in nonferrous metallurgy / V. V. Slovikovskii, A. V. Gulyaeva // Refract. Ind. Ceram. — 2012. — Vol. 53, № 1. — P. 1–3. ■

Получено 09.08.18

© А. В. Гуляева, 2019 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

10TH ADVANCES IN CEMENT-BASED MATERIALS

16–18 июня 2019 г.
 Университет шт. Иллинойс,
 г. Урбана-Шампейн, США

ceramics.org/cements2019



10-е совещание «Достижения в области материалов на основе цемента»

Техническая программа

- Аддитивное производство с использованием цементных материалов
- Химия, обработка и гидратация цемента
- Наука вычислительных материалов
- Моделирование долговечности и срока службы
- Методы исследования и характеристики материалов
- Реология
- «Умные» материалы и датчики
- Дополнительные и альтернативные цементные материалы
- Нанотехнологии в цементных материалах
- Неразрушающий контроль