

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

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

УДК 666.762.32:669.253.2.6.6

ЭФФЕКТИВНАЯ КОМБИНИРОВАННАЯ ФУТЕРОВКА ПЕЧЕЙ ДЛЯ ВЫПЛАВКИ КОБАЛЬТА

Проанализированы причины малой стойкости футеровок печей для выплавки кобальта и механизм износа огнеупоров. Разработаны вещественный состав и конструкция огнеупорной кладки печей Кульмана. Предложено применить в футеровке этих печей высокостойкие периклазовые огнеупоры марки МУ на основе плавленного зерна. Разработана конструкция кладки по определенной схеме с использованием огнеупоров МУ и МП. Данные мероприятия позволили увеличить стойкость футеровок печей Кульмана в 1,8–2,0 раза на комбинате «Южуралникель» (г. Орск).

Ключевые слова: обожженные огнеупоры, плавленные огнеупоры, химические взаимодействия, термостойкость, скорость износа.

Для получения металлического кобальта используют печи с независимой электрической дугой (печь Кульмана), которые футеруют периклазовыми огнеупорами. Технологический процесс проводится при высоких температурах (1550–1650 °С) и резких теплосменах, имеющих место при сливе металла, загрузке на обнажившуюся футеровку холодных исходных материалов и отходов. Жесткие условия эксплуатации печей Кульмана обуславливают низкую стойкость (8–12 плавов) футеровки из обожженных периклазовых огнеупоров марки МУ.

Практика эксплуатации металлургических печей показывает, что наибольшее влияние на износ огнеупорной футеровки оказывают шлаки. Наиболее изнашиваемая зона футеровки печей Кульмана — против электрической дуги по кольцу барабана печи шириной до 450 мм, т. е. практически два кольца огнеупоров по 230 мм. Толщина рабочего слоя футеровки печей Кульмана к концу кампании 80–85 мм.

Для выявления механизма разрушения футеровки были отобраны образцы периклазового огнеупора после службы из различных участков футеровки печи. Огнеупоры после службы визуально имели две зоны: рабочую и переходную. В огнеупоре после службы содержание SiO_2 увеличивается примерно в 2 раза, CaO — более чем в 5 раз (табл. 1). Кроме того, в нем появились новые фазы: сера, фтор и кобальт.

Петрографические исследования зон огнеупора МУ (рис. 1) показали, что рабочая зона представляет собой рыхлый материал розового цвета, легко превращающийся в порошок крупностью

1–0 мм. Рабочая зона имеет толщину 15–20 мм, состоит из разрозненных зерен периклаза размерами 20–50 мкм, силикатов и металлических включений кобальта. В отдельных местах наблюдается скопление зерен периклаза, образующих агрегаты размерами до 22 мм. Между зернами периклаза имеются пленки силикатов, представленные двух-

Таблица 1. Химический состав шлака и огнеупора марки МУ до и после службы

Материал	SiO_2	CaO	MgO	Fe_2O_3	S	F	Co	$\Delta t_{\text{прк}}$
Шлак I	9,85	54,34	9,22	1,64	2,87	6,5	12,39	–
Шлак II	7,06	54,64	7,10	1,06	1,35	13,62	15,17	–
Огнеупор после службы:								
рабочая зона	3,97	16,96	55,73	1,55	2,68	4,07	14,35	0,69
переходная зона	5,13	12,53	71,12	1,59	1,99	2,98	4,48	0,18
Огнеупор до службы	2,4	1,7	92,94	1,3	–	–	–	–

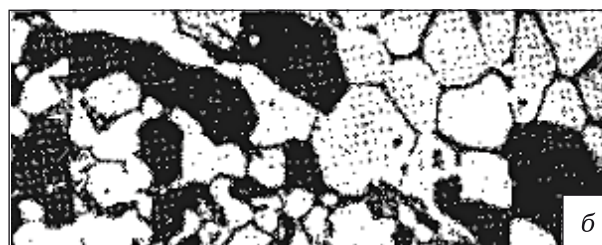
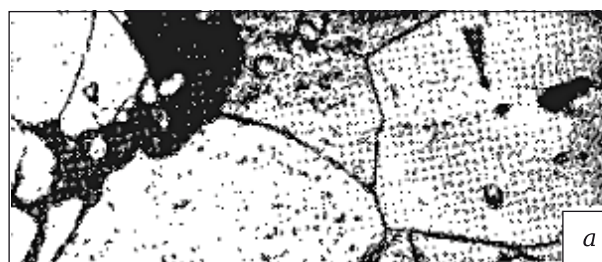


Рис. 1. Микроструктура огнеупора на основе плавленного зерна (а) и обожженного периклазового огнеупора (б)



А. В. Гуляева

E-mail: a.gulyaewa2012@yandex.ru

и трехкальциевым силикатом и небольшим количеством монтичеллита и форстерита. Силикаты также находятся в виде отдельных скоплений, в основном в связке огнеупора.

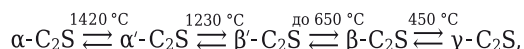
Наибольшему разрушению подвержена керамическая связка, в которой зерна периклаза полностью разобщены силикатами, по всему образцу наблюдается сеть микротрещин.

Переходная зона толщиной 50–60 мм также представлена зернами периклаза размерами до 50 мкм и силикатами. В ней, в отличие от рабочей зоны, агрегаты зерен периклаза еще не разрушены, однако связка носит следы разрушения прямых межзеренных связей, имеет микротрещины и увеличенное содержание силикатов, а также вкрапления металлического кобальта.

Результаты рентгенофазового анализа подтвердили, что в огнеупоре после службы обнаруживаются новые силикатные минералы: двух- и трехкальциевый силикаты, свободный CaO, CaF₂ и металлический кобальт.

Механизм износа периклазовых огнеупоров по результатам анализов следующий. Под действием капиллярных сил шлак проникает вглубь огнеупора. В присутствии фтора кремний и кальций, содержащиеся в шлаке, соединяются с силикатами огнеупора, связывающими зерна периклаза, с образованием двухкальциевого 2CaO·SiO₂ и трехкальциевого 3CaO·SiO₂ силикатов [1].

Получившиеся ортосиликаты имеют при различных температурах 4 или 5 модификаций:



где С — CaO; S — SiO₂.

Каждая из модификаций характеризуется своей плотностью, и при переходе из одной модификации в другую материал увеличивается или уменьшается в объеме до 12 %. При изменении температуры футеровки во время технологического процесса образовавшиеся силикаты переходят из одной модификации в другую и при изменении в объеме разрывают межзеренную связь огнеупора.

В рабочей зоне разобщенные зерна периклаза легко вступают в реакцию с фтором, кальцием и кремнием с образованием легкоплавких силикатов (температура плавления ниже 1350 °С) и смываются продуктами плавки.

Учитывая повышенные требования, предъявляемые при проведении технологического процесса к чистоте материала кладки, и жесткие условия эксплуатации, нами было принято решение применить в футеровке печей Кульмана высокостойкие периклазовые огнеупоры марки МП на основе плавного зерна (табл. 2).

Микроструктура огнеупора марки МП состоит из агрегатов зерен периклаза, связанных тонкомолотой составляющей, имеется незначительное количество силикатов и пор. Размер зерен периклаза в агрегатах достигает 800–950

Таблица 2. Химический состав огнеупоров марки МП

Материал	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Co	F	Δm _{тпк}
Огнеупор после службы:								
рабочая зона	71,7	13,02	1,79	0,8	4,86	6,37	2,68	–
переходная зона	71,6	13,86	2,05	1,0	5,29	4,58	3,01	–
Огнеупор до службы	95,3	1,4	0,3	1,4	1,3	–	–	0,3

мкм (рис. 2). Периклаз имеет нормальные оптические константы, силикаты в основном представлены монтичеллитом.

Основным отличием огнеупоров марки МП на основе плавного зерна от спеченных огнеупоров марки МУ является крупнокристаллическая структура периклаза, зерна которого в 12–15 раз крупнее зерен периклаза огнеупора марки МУ, что повышает стойкость огнеупора к воздействию реагентов плавки.

В условиях активного химического взаимодействия оксида кобальта с футеровкой основным преимуществом, определяющим повышенную стойкость огнеупоров марки МП перед огнеупорами марки МУ, являются их низкая пористость и повышенная температура начала деформации под нагрузкой (табл. 3).

На комбинате «Южуралникель» (г. Орск) были проведены испытания на печах Кульмана с полной заменой в футеровке огнеупоров марки МУ на огнеупоры марки МП на основе плавного зерна. Средняя стойкость футеровки составила 22 плавки, что в 2 раза выше по сравнению со стойкостью футеровки, выполненной из спеченных огнеупоров марки МУ.



Рис. 2. Микроструктура периклазового огнеупора на основе плавного зерна после службы

Таблица 3. Физико-механические свойства периклазовых огнеупоров

Показатели	Марка огнеупора	
	МП	МУ
Предел прочности при сжатии, МПа	40–60	60–80
Открытая пористость, %	14–17	18–24
Температура начала деформации под нагрузкой 0,2 МПа, °С	1630–1670	1600–1650

Исследованиями установлено [2], что при использовании комбинированной кладки из этих огнеупоров можно получить аналогичное увеличение стойкости футеровки; при этом расход дорогостоящих плавящихся огнеупоров снижается вдвое и, следовательно, уменьшается стоимость кладки. Было испытано сочетание огнеупоров марок МП (высокие плотность и химическая стойкость) и МУ (высокая термостойкость).

Комбинированную схему кладки выполняли следующим образом: два кольца футеровки, прилегающие к торцам печи, и сами торцы были выложены из огнеупоров марки МУ, центральную зону (два кольца под загрузочным окном) выкладывали с чередованием огнеупоров марок МУ и МП. При такой схеме кладки создается каркас из высокостойких огнеупоров марки МП на основе плавящегося зерна. Внутри

каркаса располагаются менее стойкие огнеупоры марки МУ.

За период испытаний рекомендованной комбинированной схемы кладки на 10 барабанах печей Кульмана было проведено 102 плавки и для сравнения — на 3 барабанах печей с футеровками по принятой на комбинате технологии кладки 25 плавков (табл. 4). Средняя скорость износа футеровки печей Кульмана, выполненной по комбинированной схеме кладки, 5,8 мм за плавку, футеровки сравнения — 11,5 мм за плавку; увеличение стойкости футеровки 95 %.

Таким образом, предлагаемая схема кладки футеровки печи Кульмана экономически целесообразна, так как позволяет увеличить стойкость футеровки в 2 раза при минимальном расходе дорогостоящих высокостойких огнеупоров марки МП (10–12 % от общего количества огнеупоров футеровки печей Кульмана).

Таблица 4. Стойкость футеровки печей Кульмана с применением огнеупоров марки МП

Номер печи	Кампания	Количество плавков	Скорость износа, мм за плавку	Кладка
2	1	16	6,0	Комбинированная
	2	16	6,0	»
	3	11	8,6	Аварийная остановка
	4	23	4,1	Комбинированная
3	5	19	5,0	»
	6	20	4,7	»
	7	9	10,5	Из огнеупоров марки МУ
1	8	12	8,0	Комбинированная
	9	8	12,0	Из огнеупоров марки МУ
	10	22	4,3	Комбинированная
	11	8	12,0	Из огнеупоров марки МУ

Библиографический список

1. **Зубаков, С. Н.** Минералообразование в хромомagneзитовых огнеупорах / С. Н. Зубаков. — Алма-Ата : Изд-во АН КазССР, 1980.
2. **Словиковский, В. В.** Повышение стойкости футерменного пояса горизонтальных конвертеров медно-

никелевого производства / В. В. Словиковский // Цветные металлы. — 2006. — № 2. — С. 32–34. ■

Получено 13.10.14
© В. В. Словиковский, А. В. Гуляева, 2014 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



Call for Papers!

39th INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXPOSITION ON
ADVANCED CERAMICS AND COMPOSITES

January 25-30, 2015 | Hilton Daytona Beach Resort and Ocean Center | Daytona Beach Florida, USA

ICASS 15 — 39-я конференция и выставка высокотехнологичной керамики и композитов

г. Дейтона-Бич, США

25 - 30 января 2015 г.

www.ceramics.org