

К. т. н. **К. Г. Земляной**<sup>1</sup> (✉), к. т. н. **Л. В. Серова**<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет», г. Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> АО «ЕВРАЗ-НТМК», г. Нижний Тагил, Россия

УДК 666.762.453.017:620.193

## МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ПЕРИКЛАЗОХРОМИТОВЫХ ОГНЕУПОРОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ КИСЛЫХ ШЛАКОВ

Исследованы периклазохромитовые огнеупоры после эксплуатации в условиях воздействия кислых шлаков. Показаны микроструктура и механизм коррозии огнеупоров в фаялитовых расплавах. Предложены пути повышения стойкости огнеупоров.

**Ключевые слова:** периклазохромитовые огнеупоры, футеровка, фаялитовые шлаки, поровая структура, механизм коррозии.

**О**гнеупоры в системе периклаз – хромит (хромитовая руда) широко используются в футеровке тепловых агрегатов черной металлургии при выплавке легированных и специальных сталей, цветной металлургии (отражательная печь, конвертер медноникелевого производства), а также в футеровке нагревательных печей прокатного производства, вращающихся печей цементного производства и производства полиметаллов [1–4].

Общим фактором, определяющим выбор периклазохромитовых огнеупоров в разных отраслях промышленности, является кислый характер расплавов и прежде всего шлака, непосредственно воздействующих на рабочий слой футеровки тепловых агрегатов. Поэтому изучение механизма разрушения периклазохромитовых огнеупоров в кислых шлаках является актуальной задачей, позволяющей повысить качество огнеупоров и, соответственно, стойкость футеровки.

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Химический состав исследуемых материалов определяли рентгенофлуоресцентным методом на энергодисперсионном спектрометре ARL QUANT'X (Thermo Scientific, США) с применением программы UniQUANT (Rh  $K_{\alpha}$ -излучение, мощность трубки 50 Вт, диапазон напряжения 4–50 кВ с шагом 1 кВ, диапазон тока 0–1,98 мА

с шагом 0,02 мА, детектор Si(Li), энергетическое разрешение 150 эВ). Фазовый состав определяли на дифрактометре с вращающимся анодом MiniFlex 600 (Cu  $K_{\alpha}$ -излучение,  $\lambda = 1,541862 \text{ \AA}$ , интервал съемки 3,00–60,00°, шаг сканирования 0,02°) фирмы Rigaku – Carl Zeiss (Япония) с программами управления и сбора данных MiniFlex Guidance и пакетом обработки данных PDXL Basic. Идентификацию дифракционных максимумов проводили с использованием банка данных JSPDS, полуколичественную оценку содержания фаз — с использованием корундового числа RIR (Reference Intensity Ratio) по методу Чанга (Chung) [5].

Кажущуюся плотность, открытую пористость и водопоглощение (по керосину) определяли согласно ГОСТ 2409–2014 «Огнеупоры. Метод определения кажущейся плотности, открытой и общей пористости, водопоглощения». Петрографические исследования огнеупорных изделий проводили в отраженном свете микроскопа «Олимпус» при 200-кратном увеличении; при обработке фотографий использовали систему «Сиамс».

Изучали процесс разрушения огнеупоров марки ПХС комбината «Магнезит» на основе плавящихся порошков периклаза и хромитовой руды (хромшпинелида) под действием кислого шлака фаялитового состава (табл. 1). Кроме периклаза огнеупоры содержат твердые растворы шпинелидов с обобщенной формулой  $(Mg,Fe)O \cdot (Fe,Cr,Al)_2O_3$ , силикаты в виде оливина, форстерита и монтичеллита и обладают конкретной микротрещиноватой структурой [6].

Образец огнеупора был отобран из футеровки после ее эксплуатации в течение 4 мес под воздействием жидкого фаялитового шлака, газовой среды с большим количеством CO, CO<sub>2</sub>,



К. Г. Земляной

E-mail: kir77766617@yandex.ru

Таблица 1. Химический состав образца ПХС-огнеупора до и после службы (по зонам)

Компонент шлака, мас. %	Зона					Исходный ПХС-огнеупор
	шлаковая корочка	кромка (рабочей зоны)	рабочая	переходная	наименее измененная	
SiO <sub>2</sub>	14,85	12,93	5,40	5,52	5,72	2,68
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	67,94	63,06	15,25	–	9,68	3,12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	–	–	5,42	5,51	5,59	5,78
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,159	0,177	5,24	8,58	9,38	10,15
MgO	4,71	7,71	46,99	52,25	56,35	68,42
CaO	0,415	0,381	2,67	3,15	4,25	4,38
CuO	1,9	7,68	4,51	2,41	0,557	–
PbO	0,282	0,246	0,131	0,0985	0,0244	–
ZnO	4,72	2,64	0,435	0,241	0,0985	–
Na <sub>2</sub> O	–	–	2,13	2,05	2,07	1,12
K <sub>2</sub> O	0,279	0,183	0,0349	0,0347	0,034	0,035
TiO <sub>2</sub>	0,147	0,219	0,138	0,138	0,135	0,130
SO <sub>3</sub>	3,33	3,69	8,78	6,68	5,72	–

SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub> и водяного пара, а также резких перепадов температур в интервале 1000–1400 °С. Образец огнеупора после эксплуатации показан на рис. 1. Видно, что от кромки рабочей зоны образца выделяются три зоны: рабочая, непосредственно контактирующая с расплавом/гарнисажем, мощностью от 5 до 10 мм; переходная, расположенная за рабочей зоной, мощностью от 20 до 30 мм и наименее измененная. К наименее измененной зоне примыкает неизменная зона, имеющая ту же плотность, но немного отличающаяся от предыдущей зоны цветом. На границах зон наблюдаются трещины, расположенные параллельно поверхности футеровки (см. рис. 1). Химический состав зон приведен в табл. 1. Установлено, что гарнисаж на поверхности огнеупора состоит из смеси огнеупора (MgO, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и шлака (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, CuO, ZnO, PbO, SO<sub>3</sub>) с преобладанием шлака. В рабочей зоне наблюдаются соединения железа, меди, свинца, цин-

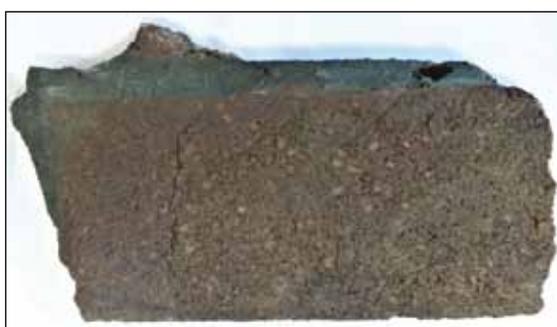


Рис. 1. Макроструктура ПХС-огнеупора после эксплуатации

ка, щелочных металлов, серы и кварца. Причем проникновение оксида меди и серы наблюдается даже в наименее измененной зоне. В то же время содержание оксидов магния и хрома уменьшается в направлении от рабочей зоны.

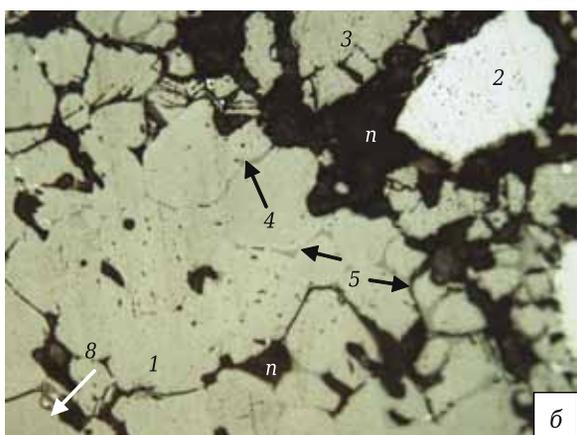
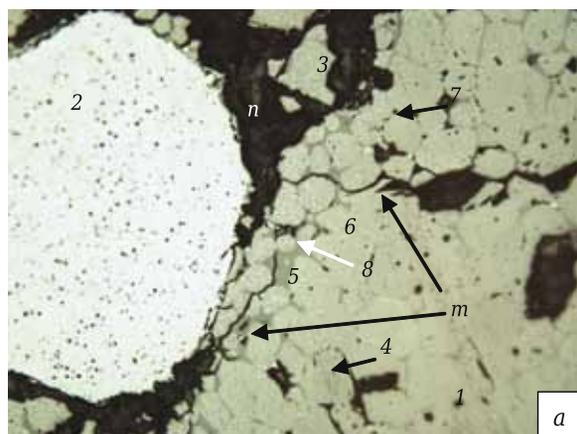
Фазовый состав кромки рабочей зоны представлен (мас. %) магнетитом FeO·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (60), магнелиевым фаялитом Mg<sub>0,26</sub>Fe<sub>1,74</sub>[SiO<sub>4</sub>] (31), магнезиоферритом (Mg<sub>0,191</sub>Fe<sub>0,809</sub>)·(Mg<sub>0,809</sub>Fe<sub>1,191</sub>)O<sub>4</sub> (7), ферритом меди CuFe<sub>5</sub>O<sub>8</sub> (3); имеются также следы железистого периклаза (Mg<sub>0,958</sub>Fe<sub>0,042</sub>)O (до 1 мас. %). Установлено также, что структура зон значительно различается (табл. 2).

Так как пористость ПХС-изделий комбината «Магнезит» составляет 14–15 % (см. табл. 2), изделия после эксплуатации в присутствии кислых шлаков значительно насыщаются легкоплавкими примесями и уплотняются. Следует отметить очень низкую пористость наименее измененной зоны, которая при визуальном осмотре не отличается от неизменной. Более высокая плотность рабочей и переходной зон обусловлена пропиткой примесями, содержащими высокоплотные соединения железа и цветных металлов (см. табл. 1).

Микроструктура образца **исходного ПХС-огнеупора** показана на рис. 2, а, б. Видно, что основными минералами ПХС-огнеупоров являются спеченный периклаз достаточно высокого качества и хромшпинелид. Спеченный периклаз не имеет посторонних включений, зерна округлой формы, прямые связи отсутствуют. Присутствуют также силикаты в виде форстерита, расположенного в виде тонких прослоек между зернами спеченного периклаза, и монтчеллита

Таблица 2. Свойства ПХС-огнеупора до и после службы (по зонам)

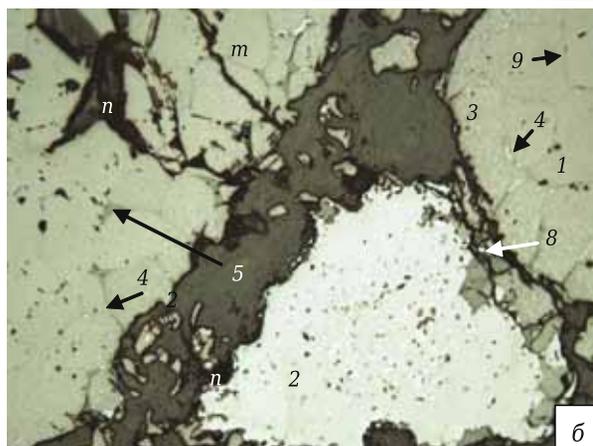
Показатель	Зона				Исходный ПХС-огнеупор
	кромка (рабочей зоны)	рабочая	переходная	наименее измененная	
Открытая пористость, %	2,9	5,4	10,1	13,2	14,5
Кажущаяся плотность, г/см <sup>3</sup>	4,62	3,50	3,27	3,17	3,15
Водопоглощение, %	0,5	1,2	2,4	3,3	3,6



**Рис. 2.** Микроструктура образца ПХС-огнеупора до спекания: 1 — спеченный периклаз; 2 — хромшпинелид; 3 — вторичные шпинелиды сложного состава; 4 — форстерит; 5 — монтичеллит; 6 — двухкальциевый силикат; 7 — мервинит; 8 — магнизоферрит; *n* — поры; *m* — термические трещины

в виде линз между зернами периклаза, а также незначительное количество двухкальциевого силиката (ларнита) и мервинита. Хромшпинелид имеет четкие грани; трещины, раковины отсутствуют. В небольшом количестве наблюдаются вторичные шпинели сложного состава, расположенные по краям кристаллов основных фаз и в тонкомолотой составляющей. Агрегаты, сформированные из зерен основных фаз периклаза и хромшпинелида, сцементированы мелкозернистой массой сложного состава, включающей мелкие зерна периклаза, периклазохромит, хромит, силикаты. В образце имеется невысокое содержание магнизоферрита, так как оксиды железа, присутствующие в природном сырье, при обжиге полностью переходят в магнизоферрит; при этом его содержание невысокое.

Структура образца разнородная, достаточно пористая, поры *n* крупные, канального характера. Цвет образца светло-коричневый с яркими зернами шпинели, силикатные прослойки светлые. Следует отметить наличие мелких трещин *m*, указывающих, скорее всего, на нарушенные технологии обжига огнеупора. Трещины не

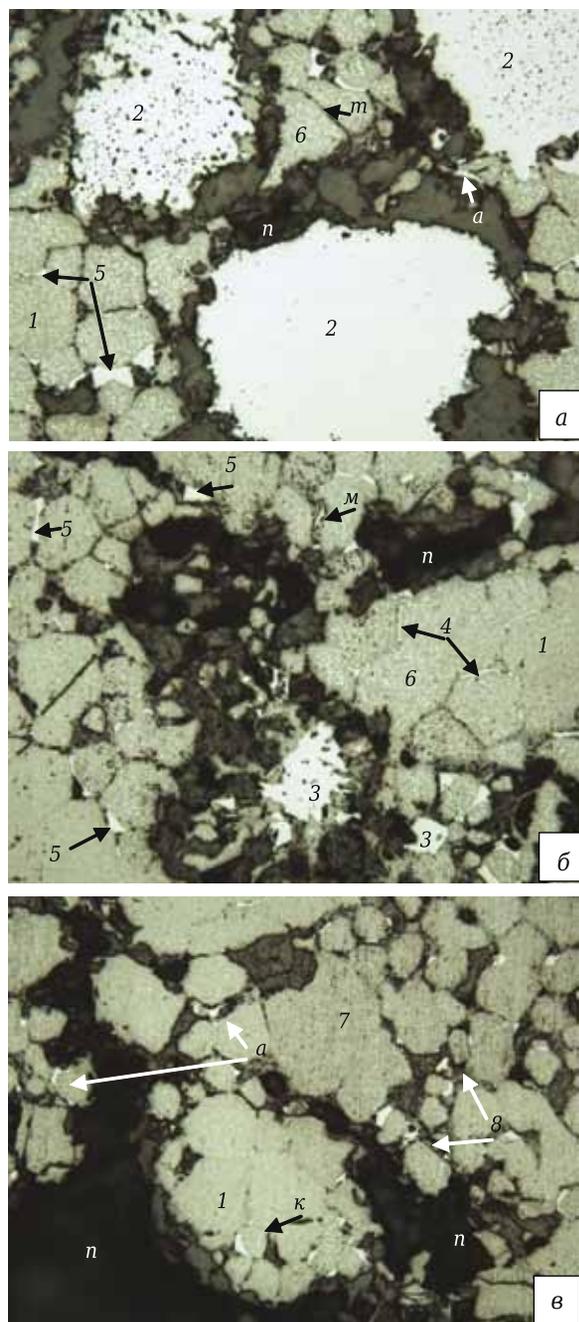


**Рис. 3.** Микроструктура наименее измененной зоны образца ПХС-огнеупора: 1 — спеченный периклаз; 2 — хромшпинелид; 3 — вторичные шпинелиды сложного состава; 4 — форстерит; 5 — монтичеллит; 6 — двухкальциевый силикат; 7 — мервинит; 8 — магнизоферрит; 9 — прямые связи в зерне периклаза; *n* — поры; *m* — термические трещины

являются перепрессовочными и расположены в основном по зернам периклаза. Температура обжига была достаточно высокой, что подтверждается структурой образца.

**Наименее измененная** зона (рис. 3, а, б) имеет светло-коричневый цвет, ее пористость ниже, чем у изделий до службы, что является результатом некоторого уплотнения структуры вследствие спекания под воздействием температуры, газовой среды и пропитки компонентами шлака. Фазовый состав образца представлен минералами огнеупора до службы. Цвет периклаза светло-коричневый, на зернах появляется светло-коричневая корочка, состоящая из отложений силикатов сложного состава и вторичных шпинелидов. Количество силикатов по сравнению с неизменной зоной увеличивается. Высокая температура способствует миграции легкоплавких фаз от рабочей поверхности в объем изделия и формированию прямых связей 9 в зернах периклаза. Зерна хромшпинелида (хромита) изменяют форму и структуру: края зерен становятся неровными, в них появляются трещины *m*, на краях увеличивается количество вторичных

шпинелидов более темного цвета, зерна которых также располагаются вокруг монокристаллов периклаза. Имеются оксиды железа в форме магнетиоферрита  $\delta$  и магнетита в виде тонких отложений на зернах периклаза (в порах) и отдельных включений на краях зерен хромита. Поры  $n$  образца в процессе службы видоизменяются, становятся прерывистыми. Появляются термические трещины  $t$  не только в периклазе,



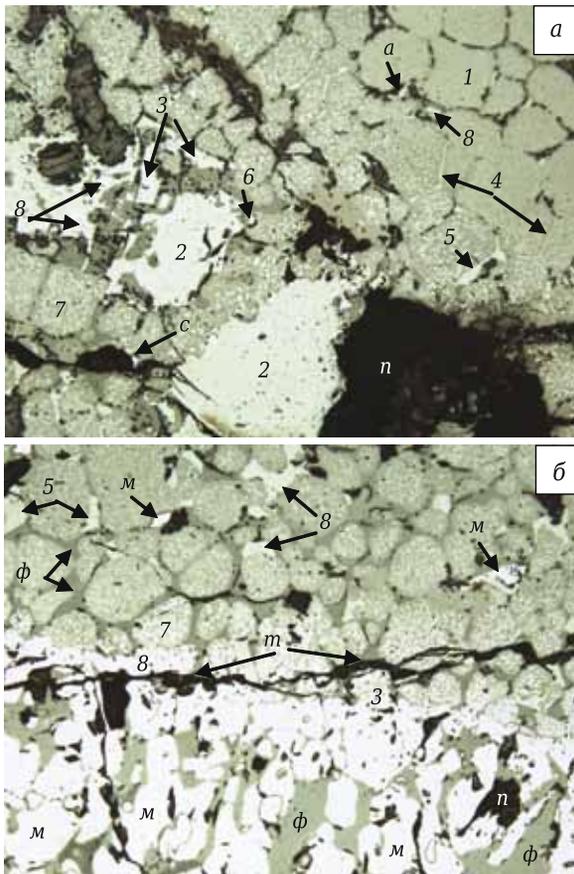
**Рис. 4.** Микроструктура переходной зоны образца ПХС-огнеупора: 1 — спеченный периклаз; 2 — хромшпинелид; 3 — вторичные шпинелиды сложного состава; 4 — форстерит; 5 — монтичеллит; 6 — двухкальциевый силикат; 7 — мервинит; 8 — магнетиоферрит;  $n$  — поры;  $t$  — термические трещины;  $a$  — оксиды цветных металлов;  $k$  — карбиды;  $m$  — магнетит

но и в хромшпинелиде. Роль связки выполняют мелкие зерна периклаза, периклазохромита и силикаты. Существенных фазовых изменений в зоне не наблюдается.

**Переходная зона** (рис. 4, *a–в*) имеет более плотную структуру, чем наименее измененная, что вызвано воздействием высоких температур и газовой фазы ( $SO_3$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ , пары  $R_2O$ ). Размеры пор  $n$  уменьшаются, изменяется их форма. Основными минералами переходной зоны являются периклаз и крупные зерна хромшпинелида (хромита). Продолжается поверхностное перерождение периклаза под воздействием фаялита шлака. Отдельные зерна хромита имеют трещиноватую структуру с пониженным показателем преломления — результат диффузии катионов железа из шлака с образованием оксидов железа, заполняющих трещины и поры в кристаллах периклаза и хромита. Оксиды железа по отражательной способности можно отнести к магнетиту  $Fe_3O_4$  ( $m$ ). Начинается миграция трехвалентных катионов из хромшпинелида, уменьшается их количество (см. табл. 1). Следует отметить присутствие в образце хромита высокого качества, зерна которого мало подвержены изменению. Крупные зерна сцементированы мелкозернистой массой сложного состава, включающей периклаз, периклазохромит, хромит, силикаты (форстерит, монтичеллит), а также вторичные шпинели сложного состава  $(Mg,Fe)O \cdot (Al,Fe)_2O_3$ , образованные при взаимодействии зерен периклаза с хромшпинелидом.

Экстремальные условия службы огнеупора приводят к началу миграции в футеровку оксидов металлов, которые конденсируются по краям зерен периклаза и шпинелида и в порах. Увеличивается количество включений магнетита  $m$  с высокой отражательной способностью, которые располагаются по периферии кристаллов основных компонентов и в порах. Появляются также карбиды железа  $k$ , расположенные по краям кристаллов и в трещинах.

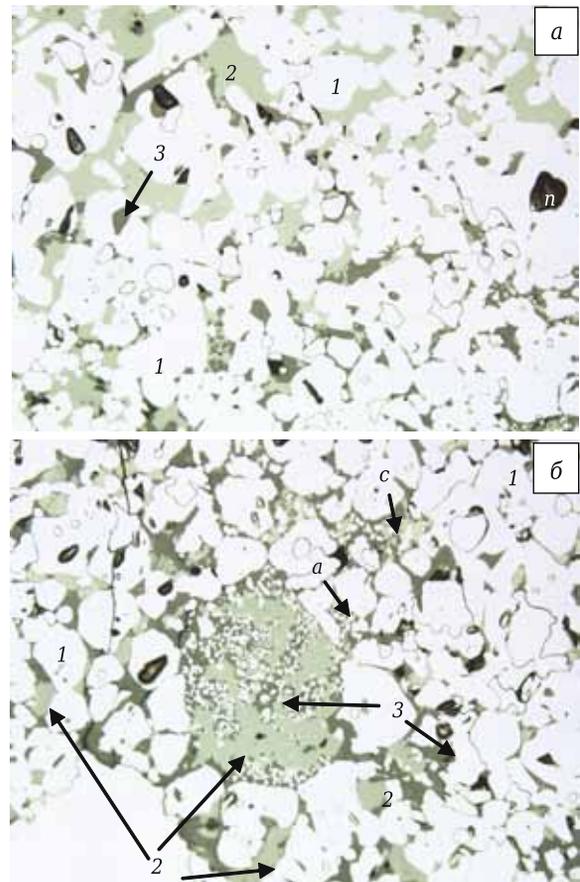
**Рабочая зона** (рис. 5) состоит из двух хорошо различимых подзон: *незначительно пропитанной* расплавами металла и шлака (рис. 5, *a*) и *пропитанной* (рис. 5, *б*). Структура незначительно пропитанной подзоны продолжает изменяться при дальнейшем воздействии высоких температур и проникновении легкокипящих компонентов в жидком и газообразном состоянии, а также продуктов горения ( $SO_2$ ,  $SO_3$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $R_2O$ ). В результате подзона становится рыхлой, изменяется форма пор — они становятся округлыми, закрытыми, уменьшаются в размерах. Основную массу представляют агрегаты периклаза и хромшпинелида (первичного и вторичного). Кристаллы спеченного периклаза приобретают рыхлую структуру, уменьшаются в размерах, на поверхности образуются корочки из железистых силикатов магния. Роль



**Рис. 5.** Микроструктура рабочей зоны образца ПХС-огнеупора: 1 — спеченный периклаз; 2 — хромшпинелид; 3 — вторичные шпинелиды сложного состава; 4 — форстерит; 5 — монтичеллит; 6 — двухкальциевый силикат; 7 — мервинит; 8 — магнезиоферрит; n — поры; m — структурная трещина; a — оксиды цветных металлов; ф — фаялит; м — магнетит; с — корольки металла

связки в незначительно пропитанной подзоне выполняют мелкие зерна периклаза и периклазохромита, сцементированные силикатной связкой, состоящей из форстерита, монтичеллита и вторичных шпинелей сложного состава  $(Mg,Fe)O \cdot (Al,Fe)_2O_3$ , образованных при взаимодействии периклаза с компонентами хромшпинелида. Содержание  $SiO_2$  увеличивается, при этом на поверхности зерен периклаза формируется более тугоплавкая фаза  $Ca_2SiO_4$ . Продолжается растворение хромшпинелида, зерна хромита становятся рыхлыми, пористыми, изменяются их форма и очертание; увеличивается количество трещин. Экстремальные условия службы огнеупора в рабочей зоне приводят к активному взаимодействию фаялита с огнеупорными фазами и миграции ферритов и оксидов цветных металлов a в структуру огнеупора. Увеличиваются количество и размер включений с высокой отражательной способностью — магнетита м и металла с.

В пропитанной подзоне процесс миграции расплава металла и шлака (фаялита и силикатов) приводит к пропитке огнеупора (см. рис. 5, б), растворению периклаза и хромита и, как



**Рис. 6.** Микроструктура шлаковой корочки рабочей зоны (гарнисажа): 1 — феррит и магнетит; 2 — фаялит; 3 — сульфферрит; n — поры; a — оксиды цветных металлов; с — корольки металла

следствие, к образованию сплошной трещины m по границе пропитанной подзоны. Появляются корольки металла с с высокой отражательной способностью.

Износ футеровки на контакте с расплавами металла и шлака происходит вследствие их проникновения по поровой структуре в объем огнеупора, в котором происходит взаимодействие шлаковых компонентов  $Fe_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $R_2O$  с огнеупорными минералами в условиях сложной газовой среды ( $SO_3$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $O_2$ ) с образованием легкоплавких соединений, вновь переходящих в расплав. Из рис. 5, б видно, что пропитанная подзона резко отделяется трещиной m, разделяющей обе подзоны и образовавшейся из-за разных термомеханических свойств подзон при перепаде температур в ходе охлаждения футеровки. Пропитанная подзона состоит из магнетита, ферритов и оксидов цветных металлов, железистого периклаза, отдельных зерен периклаза и хромита. Структура сцементирована легкоплавкими силикатными расплавами.

**Шлаковая корочка рабочей зоны** (гарнисаж, рис. 6, а, б) образуется в результате взаимодействия огнеупора с мигрирующими оксидами шлака, металлом и газовой фазой; присутству-

ют замкнутые поры округлой формы. Структура зоны плотная, состоит из магнетита, ферритов магния, кремния и цветных металлов, оксидов железа и цветных металлов *a*. Следует отметить также присутствие единичных видоизмененных зерен шпинелида, представляющих собой конгломерат первичного и вторичного хромшпинелида. Цементирующая фаза представлена легкоплавкими силикатными расплавами.

Таким образом, проведенные исследования показали, что воздействие на ПХС-огнеупоры кислых шлаков, легкоплавких примесей, газов ( $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$ ) приводит к образованию зонной структуры огнеупора. Зоны значительно различаются по химическому и фазовому составам, структуре и физическим свойствам, в частности по ТКЛР. В результате колебания температуры в процессе эксплуатации теплового агрегата на границах зон возникают тепловые напряжения, приводящие к образованию трещин, направленных параллельно поверхности футеровки, и к пропитке огнеупора расплавами и газами. Развитие трещин приводит к скалыванию слоев материала и уменьшению его толщины. Такое термическое скалывание является основным механизмом разрушения периклазохромитовой футеровки.

Следует отметить, что в процессе пропитки расплав разделяется на фракции по признаку температуры плавления («химолит» расплава) и более легкоплавкие примеси проникают практически на всю толщину футеровки. Даже наименее измененная зона, которая визуально кажется неповрежденной, насыщается сульфатными соединениями и цветными металлами. Это подтверждается низкой пористостью этой зоны (намного более низкой, чем у исходных огнеупоров, см. табл. 2).

Понимание механизма коррозии ПХС-огнеупоров под действием кислых шлаков является основой для определения путей повышения стойкости огнеупоров. Поскольку разрушение огнеупора на первом этапе происходит за счет его пропитки по порам, он должен обладать низкой пористостью. Крупные поры ( $>10$  мкм) особенно опасны, так как в них легко проникают примеси. Напротив, мелкие поры способствуют релаксации напряжений при перепаде температуры в процессе эксплуатации футеровки. Независимо от размера пор большое значение имеют их взаимное расположение и связность в единую систему, характеризующуюся газопроницаемостью, которая должна быть наименьшей. Пористость огнеупорных изделий зависит также от зернового состава смеси, условий прессования, температуры обжига, состава сырья и т. д. Уменьшить пористость огнеупора за счет изменения технологических параметров производства довольно сложно и дорого; при этом пористость периклазохромитовых изделий можно снизить только на несколько процентов. Иссле-

дования [7–10] подтвердили, что существенно снизить открытую пористость для повышения стойкости при рассмотренном выше механизме износа огнеупорных изделий можно за счет пропитки огнеупора соединениями, разлагающимися в процессе нагревания с выделением тонкодисперсных огнеупорных фаз (например, сульфатом магния, оксидами хрома и циркония, углеродом). Следует отметить, что крупные поры легче поддаются насыщению, чем мелкие. Другие исследования [11, 12] показывают также большое влияние сульфата магния на ряд свойств огнеупоров, в том числе и периклазохромитовых.

Повышение стойкости ПХС-огнеупоров к кислым шлакам возможно проектированием состава и структуры огнеупорных изделий специально для эксплуатации в условиях воздействия низковязких (вследствие высокого содержания легкоплавких соединений) кислых шлаков, для чего необходимо:

- снизить количество свободного оксида магния в изделиях;
- организовать поиск и подбор фаз с высокой коррозионной стойкостью по отношению к расплавам в системе  $\text{FeO-SiO}_2\text{-CuO-PbO-SO}_3\text{-ZnO-R}_2\text{O}$ ;
- снизить открытую пористость и средний размер пор огнеупорных изделий за счет:
  - подбора зернового и вещественного составов шихты, обеспечивающих максимальную плотность укладки и степень спекания исходных порошков;
  - подбора режимов обжига для образования большого числа прямых сростков кристалл-кристалл и закрытой пористости, а также снижения количества стеклофазы;
  - уменьшения количества и размера открытых пор ( $<10$  мкм), а также модифицирования их поверхности материалами, снижающими смачивание огнеупоров железосодержащими расплавами за счет их насыщения растворами / расплавами прекурсоров, которые при разложении заполняют поры огнеупорными фазами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Основной причиной коррозии ПХС-огнеупоров в кислых фаялитовых шлаках является их пропитка по поровой структуре жидкими и газообразными продуктами плавки, увеличивающая площадь химического взаимодействия корродиентов с огнеупором. Цветные и щелочные металлы, присутствующие в продуктах плавки, существенно снижают вязкость расплавов и ускоряют пропитку.

2. Химическая коррозия ПХС-огнеупоров в фаялитовых шлаках быстрее происходит по силикатной стеклофазе и тонкодисперсной части ших-

ты (спеченному периклазу) с их полным перерождением в железисто-силикатно-магнезиальную стеклофазу. Крупные зерна хромита имеют наименьшую скорость растворения, которая проходит по механизму диффузии из зерен катионов железа и ускоряется в присутствии в газовой фазе соединений серы и щелочных металлов.

3. Процессы коррозии совместно с градиентом температуры по толщине огнеупорного изделия приводят к образованию зон с разными химическим составом и теплофизическими

свойствами. Мощность зон зависит от градиентов концентраций и температуры, по границам которых происходит термическое скалывание огнеупора при перепадах температур в процессе эксплуатации футеровки.

4. Установлено образование в шлаковой корочке сульфоферритных соединений переменного состава.

5. Предложены пути повышения стойкости ПХС-огнеупоров к воздействию фаялитовых шлаков.

### Библиографический список

1. **Кащеев, И. Д.** Каталог-справочник. Огнеупоры: материалы, изделия, свойства и применение. В 2 кн. Кн. 1 / И. Д. Кащеев, М. Г. Ладыгичев, В. Л. Гусовский. — М.: Теплоэнергетик, 2003. — 336 с.
2. **Кащеев, И. Д.** Каталог-справочник. Огнеупоры: материалы, изделия, свойства и применение. В 2 кн. Кн. 2 / И. Д. Кащеев, М. Г. Ладыгичев, В. Л. Гусовский. — М.: Теплоэнергетик, 2003. — 320 с.
3. **Кащеев, И. Д.** Свойства и применение огнеупоров: справ. изд-е / И. Д. Кащеев. — М.: Теплоэнергетик, 2004. — 352 с.
4. **Ижорин, М. Н.** Сооружение промышленных печей. Т. 2. Строительство печей / М. Н. Ижорин, Ю. П. Сторожков. — М.: Теплотехник, 2006. — 720 с.
5. **Hubbard, C. R.** The reference intensity ratio for computer simulated powder patterns / C. R. Hubbard, E. H. Evans, D. K. Smith // J. Appl. Cryst. — 1976. — Vol. 169, № 9. — P. 169–174.
6. **Кащеев, И. Д.** Химическая технология огнеупоров / И. Д. Кащеев, К. К. Стрелов, П. С. Мамыкин. — М.: Интернет Инжиниринг, 2007. — 752 с.
7. **Pat. USN 3789096.** Method of impregnating porous refractory bodies with inorganic chromium compound / Church P. K., Knutson O. J.; filling date 28.12.1967.
8. **Коледа, В. В.** К вопросу упрочнения нитридыкремневой керамики методом пропитки / В. В. Коледа,

В. М. Свистун, Л. В. Дорошенко [и др.] // Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов. Жаропрочные керамические материалы: науч.-техн. конф.: тез. докл. — М.: ВНИИМИ, 1990. — Ч. 1. — С. 60.

9. **Кащеев, И. Д.** Влияние пропитки магнезитовых огнеупоров на их шлакоустойчивость / И. Д. Кащеев, П. С. Мамыкин // Труды ВостИО. № 11. — М.: Metallurgia, 1971. — С. 134–138.

10. **Кащеев, И. Д.** Влияние растворимых солей хрома на спекание окиси магния: сб. науч. тр. УПИ «Керамика, огнеупоры и шлаки». № 199 / И. Д. Кащеев, П. С. Мамыкин, В. А. Перепелицын, Л. Я. Долгушина. — Свердловск, 1971. — С. 74–78.

11. **Wang, B.** Influence of impregnation by magnesium sulfate solution on properties of magnesia – chrome bricks / B. Wang, R. Yu, S. Shi // Naihao Cailiao / Refractories. — 2008. — Vol. 42, № 4. — P. 279–281.

12. **Yong-Yue, D.** Influence of chrome-bearing sols vacuum impregnation on the properties of magnesia-chrome refractory / D. Yong-Yue, W. Hou-Zhi, Z. Hui-Zhong // Ceram. Int. — 2008. — Vol. 34, № 3. — P. 573–580. ■

Получено 10.02.20

© К. Г. Земляной, Л. В. Серова, 2020 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



26<sup>th</sup> International Conference on  
Advanced Materials,  
Nanotechnology and Engineering

June 22-23, 2020 | Brisbane, Australia

Advanced Materials 2020