

тивы / А. Г. Мержанов, М. Б. Каширенинов. — М. : ВИНТИ, Центр, 1987.

4. **Сатбаев, Б. Н.** Технологические характеристики новых синтезированных огнеупоров / Б. Н. Сатбаев, А. А. Жарменов, А. И. Кокетаев, Н. Т. Шалабаев // Новые огнеупоры. — 2013. — № 5. — С. 42–47.

Satbaev, B. N. Production properties of new synthesized refractories / B. N. Satbaev, A. A.

Zharmenov, A. I. Koketaev, N. T. Shalabaev // Refractories and Industrial Ceramics. — 2013. — Vol. 54, № 3. — P. 210–214. ■

Получено 18.03.15

© Б. Н. Сатбаев, А. А. Жарменов, А. И. Кокетаев, Н. Т. Шалабаев, С. Б. Сатбаев, 2015 г.

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

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

УДК 666.76.621.365.22.043.1

ФУТЕРОВКА РУДНО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕЧИ ПОВЫШЕННОЙ СТОЙКОСТИ

Цель работы — анализ причин малой стойкости футеровки рудно-термической печи для плавки аргиллитов и механизма износа футеровки. В результате проведенного анализа разработанная конструкция электропечи позволила обеспечить ее безопасную безаварийную работу, увеличить коэффициент использования во времени (от 0,33 до 0,73) и объем перерабатываемой шихты, сократить количество ремонтов и расход электроэнергии. Срок службы увеличился с 3 до 16 мес. На Лениногорском полиметаллическом комбинате внедрена аналогичная футеровка с применением углеродистых блоков в подине электропечи свинцового производства.

Ключевые слова: футеровка, рудно-термическая печь, огнеупоры на основе плавного зерна, периклазохромитовый и хромитопериклазовый огнеупоры, углеродистые блоки.

Для экономии огнеупоров очень важно иметь равномерно изнашивающуюся по всей поверхности футеровку. Получить равностойкую футеровку можно при условии использования дифференцированной кладки, сочетающей огнеупоры различной стойкости к реагентам плавки и газовой среды. Известны работы, касающиеся применения комбинированных схем кладки в агрегатах цветной металлургии [1–3]. Для повышения стойкости футеровки наиболее изнашиваемых зон в тепловых агрегатах цветной металлургии ВНИИЭнергоцветметом разработаны и внедрены комбинированные схемы кладки [4]. В настоящей статье рассмотрен опыт применения комбинированной футеровки рудно-термической печи на специализированном предприятии «Ангренэнергоцветмет». Для правильного выбора огнеупоров, рационального способа кладки и выяснения путей повышения ее стойкости необходимо знать условия эксплуатации, характер разрушений футеровки агрегата в зависимости от различных факторов, а также технические возможности огнеупорных материалов.

Продолжительность службы футеровки электропечи для плавки аргиллитов в условиях предприятия «Ангренэнергоцветмет» составляла 2–3 мес. Печь имела принудительное охлаждение: подина охлаждалась воздухом, свод и стены — технической водой, подаваемой в кессоны; свод состоял из пяти ошипованных кессонов. По шипам нанесена хромомagneзитовая масса. Стены печи состояли из двух рядов водоохлаждаемых кессонов: верхнего и нижнего. В каждом ряду по 15 кессонов. Верхний ряд кессонов ошипован и обмазан по шипам хромомagneзитовой массой. Футеровку нижнего ряда кессонов выполняли из хромомagneзитовых огнеупоров, подину — из шамотных, хромомagneзитовых огнеупоров и углеродистых блоков высотой 400 мм. Углеродистые блоки не спекались между собой, что приводило к проникновению металла по швам.

Для исследования рациональной конструкции футеровки электропечи были испытаны на взаимодействие с расплавами шлака, сульфидной и металлической фазами огнеупоры следующих видов: ПХПУ — периклазохромитовые на основе плавного периклазохромита, ХМ — хромитопериклазовые, ПХС — периклазохромитовые, МПМ — периклазовые плавные, ШБ — шамотные, ПО — углеродистые. Свойства огнеупоров приведены в табл. 1. Ис-



А. В. Гуляева

E-mail: a.gulyaewa2012@yandex.ru

Таблица 1. Физико-механические показатели огнеупорных изделий

Показатели	ПХПУ	ХМ	ПХС	МПМ	ШБ	ПО
Предел прочности при сжатии, МПа, не менее	30,0	25,0	30,0	30,0	40,0	27,4
Термостойкость (1300 °С – вода), теплосмены, не менее	6	3	5	1	12	Не норм.
Открытая пористость, %, не более	16	24	20	17,5	24	21
Кажущаяся плотность, г/см ³ , не менее	3,10	2,95	2,90	2,86	2,02	–
Температура начала деформации под нагрузкой 0,2 МПа, °С	1640	1500	1600–1650	1630–1670	1300	–

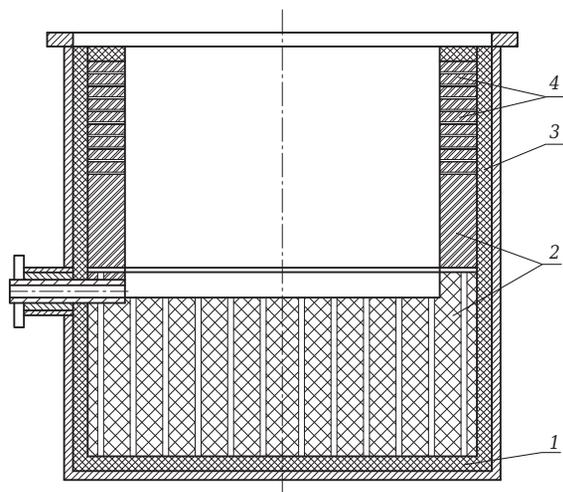


Рис. 1. Схема комбинированной футеровки рудно-термической печи: 1 – углеродистая набивка; 2 – углеродистые блоки; 3 – хромагнетитовая засыпка; 4 – шамотные огнеупоры

следования выполняли методом погружения образцов огнеупоров в расплавы шлака, сульфидной и металлической фаз. Образцы отбирали из промышленной печи предприятия «Ангренэнергоцветмет». Расплавы готовили расплавлением твердых образцов в графитовом тигле в печи Таммана в восстановительных условиях, близких к условиям промышленной печи. Температура расплава 1450 °С. Из стандартных огнеупоров вырезали образцы размерами 32×32×66 мм. Перед погружением их нагревали над расплавом при 1450 °С в течение 0,3 ч, затем опускали в расплав на глубину 20 мм и выдерживали в течение 1 ч. Степень пропитки определяли на микроскопе NU-2.

Установлено, что интенсивность пропитки зависит от состава расплавов и огнеупоров. Большая пористость и трещиноватость огнеупора способствуют увеличению миграции расплава. Наиболее стойкими в ряду магнезиальных огнеупоров оказались огнеупоры ПХПУ и МПМ на основе плавленного зерна. Очевидно, это связано с увеличением количества прямых межзеренных связей и уменьшением пористо-

сти. Однако огнеупоры марки МПМ нетермостойкие, поэтому использовать их в условиях периодического режима производства не рекомендуется. Углеродистые изделия ПО, как показали лабораторные исследования, отличаются значительной устойчивостью к воздействию жидких шлаков и металлов. Эти огнеупоры не плавятся и не деформируются при температуре службы.

На основании лабораторных исследований и конструктивных разработок для увеличения кампании электропечи предприятия «Ангренэнергоцветмет» была усовершенствована ее футеровка, что предусматривало применение углеродистых блоков, размещение леток для выпуска металла и шлака, замену кессонов пленочным водяным охлаждением и установку неводоохлаждаемого свода. На рис. 1 показана схема футеровки печи. Подина выложена из углеродистых блоков высотой 1600 мм. Высота углеродистых блоков определена расчетом удаления точки, в которой происходит застывание расплава, т. е. при данной высоте расплав в случае проникновения его по швам успеет застыть, не попав под блоки. Швы между блоками заполняли самоспекающейся углеродистой пастой. Увеличение толщины футеровки подины и заполнение швов обеспечило монолитность и предотвратило проникновение расплава под блоки и всплытие подины. Для создания равностойкой футеровки кладку стен печи выполняли комбинированно в два слоя. Нижний слой, контактирующий с расплавом, футеровали углеродистыми блоками, зазор между блоками и кожухом заполняли углеродистой пастой для придания кладке монолитности. Верхний слой, находящийся выше уровня расплава, футеровали периклазохромитовыми огнеупорами на основе плавленного периклазохромита, а зазор между кожухом и кладкой заполняли хромагнетитовой спекающейся засыпкой, которая позволила обеспечить герметизацию и монолитность огнеупорной кладки.

После 30 сут работы печь была остановлена для контрольного обследования состояния фу-

Таблица 2. Химический состав огнеупоров после службы

Огнеупор	Зона	Содержание, %					
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	C	Na ₂ O	K ₂ O
Шамотный	Рабочая	54,93	26,00	2,86	–	–	–
	Переходная	60,45	31,20	1,55	–	–	–
	Наименее измененная	60,15	29,80	1,97	–	–	–
Углеродистый	–	0,34	0,80	–	88,60	2,59	0,64

теровки. Визуальный осмотр подины показал, что на ней образовался гарнисаж толщиной 10–15 см вследствие высокой теплопроводности графита. Было предложено исключить принудительное охлаждение, чтобы предотвратить зарастание подины. В стенах печи в районе шлакового пояса начался износ углеродистой футеровки, толщина изношенного слоя составила 60 мм. В процессе работы печи в периодическом режиме в результате оголения углеродистых блоков при выпуске шлака и отсутствии слоя шихты над уровнем расплава произошли разрушение блоков и обрушение периклазохромитовой футеровки стен, которая имела незначительный износ. Ввиду этого при проведении текущего ремонта после 3 мес работы печи стены в районе газового пространства были выполнены шамотными изделиями взамен дорогостоящих дефицитных плавящихся периклазохромитовых огнеупоров.

Анализ стойкости футеровки рудно-термической печи после реконструкции показал, что на границе расплава и газовой среды наиболее сильно проявляются все агрессивные факторы воздействия на футеровку. Износ огнеупоров в этой зоне усиливается и более высокой температурой — 1350–1450 °С, в то время как температура на подине не поднимается выше 1220 °С, а в районе газового пространства под сводом — выше 800 °С. На износ футеровки влияют также неоднородность шихты по химическому составу и перегрев шлака при его выпуске. Изменение конструкции кожуха печи путем увеличения соотношения высоты кожуха и его диаметра позволило создать достаточную засыпку из шихты над расплавом, предохраняющую графитсодержащую футеровку от окисления. Для обеспечения безопасной и безаварийной работы кессоны заменены пленочным охлаждением. Стойкость реконструированной футеровки печи составила 16 мес. Для изучения взаимодействия футеровки с продуктами плавки были проведены петрографический и химический анализы.

После окончания кампании электропечи были отобраны пробы шамотного огнеупора в районе газового пространства и углеродисто-

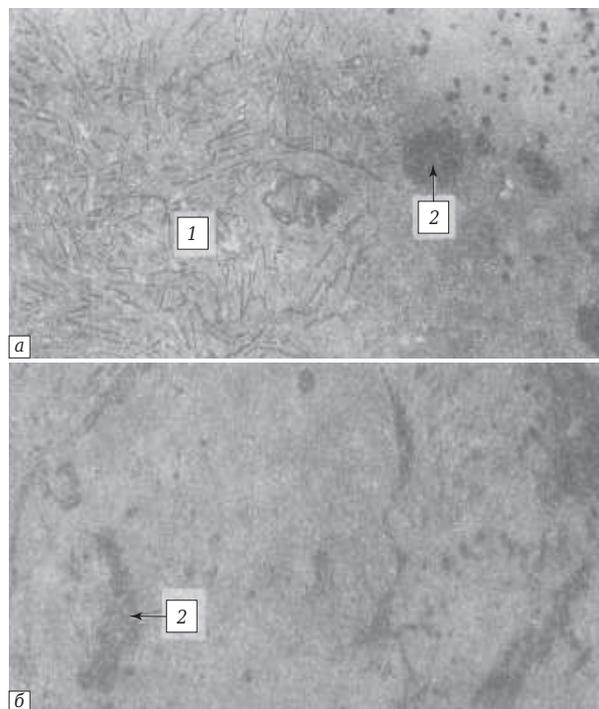


Рис. 2. Микроструктура шамотного огнеупора после службы в рудно-термической печи: а — рабочая зона; б — переходная зона; 1 — муллит; 2 — поры

го блока с подины. Результаты исследований показали, что шамотный огнеупор во время службы приобрел зональное строение (табл. 2). В нем выделяются наименее измененная, переходная (2 подзоны) и рабочая зоны. На поверхности рабочей зоны наблюдается стекловидная корочка. Рабочая зона огнеупора толщиной от 2 до 5 мм представлена иглами муллита, остатками зерен шамота, стеклом (рис. 2, а). Две переходные подзоны толщиной по 20 мм имеют розоватую окраску и отличаются друг от друга лишь ее оттенками; микроскопически различий между подзонами практически не наблюдается. В переходной зоне при сильном увеличении можно различить стекловидное вещество, пронизанное мельчайшими иглками муллита (рис. 2, б). Происходит муллитизация зерен шамота и связующей массы. Наименее измененная зона почти ничем не отличается от огнеупора до службы. Таким образом, ос-

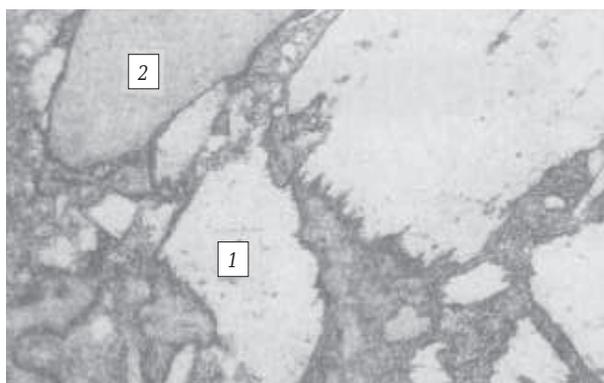


Рис. 3. Микроструктура углеродистого блока после службы в рудно-термической печи: 1 — графит; 2 — муллитовый шамот

новые изменения в огнеупоре происходят в рабочей зоне, в которой под действием температуры и минералов газовой фазы образуется и накапливается стекло, а также укрупняются кристаллики муллита по мере продвижения к горячему концу огнеупора. В углеродистом блоке изменений после службы не обнаружено (см. табл. 2). Структура огнеупора показана на рис. 3. Зерна графита разобщены порами и зернами муллитизированного шамота.

По результатам исследования механизм износа огнеупоров можно представить следующим образом. В шамотных изделиях под действием температуры, минералов газовой фазы и выбросов высокотемпературного шлакового расплава происходят образование и

накопление легкоплавкого стекла, которое вытекает вместе с взвешенными в нем кусочками огнеупора. В углеродистых блоках изменений не происходит. Это обусловлено прежде всего свойствами углерода и, в частности, его кристаллической модификации — графита. Подина разрушается за счет возникновения трещин при остановках печи, взаимодействия с кислородом, имеющимся в расплаве, и расклинивающего действия муллита. Стены выгорают в области шлакового пояса ввиду проникновения воздуха через слой непроплавленной шихты. По результатам проведенных исследований разработана и испытана рациональная схема футеровки рудно-термической печи с применением высокостойких углеродистых огнеупоров и огнеупорных масс, что позволило увеличить срок службы футеровки в 2,5 раза. Разработанная конструкция электропечи позволила обеспечить ее безопасную и безаварийную работу, увеличить коэффициент использования во времени (от 0,33 до 0,73) и объем перерабатываемой шихты, сократить количество ремонтов и расход электроэнергии. Срок службы футеровки увеличился от 3 до 16 мес. Опыт применения комбинированной футеровки может быть распространен на электропечи цветной металлургии. На Лениногорском полиметаллическом комбинате внедрена аналогичная футеровка с применением углеродистых блоков в подине электропечи свинцового производства.

Библиографический список

1. *Strimple R. A., Beerhan C. R., Muhlhausen J. F.* // J. of Metals. — 1974. — Vol. 26, № 11. — P. 33, 35, 36, 39–41.
2. *А. с. 145602 СССР* / К. К. Стрелов // Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки. — 1962. — № 6. — С. 28.
3. *А. с. 145662 СССР* / А. С. Сухариер, А. И. Коровкин, В. Т. Табалаев [и др.] // Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки. — 1962. — № 6. — С. 38.
4. *Биркле, Г. В. Б.* Применение комбинированной футеровки в конвертерах медного производства //

Г. В. Б. Биркле, В. В. Словиковский, Т. А. Данилова [и др.] // Огнеупоры. — 1986. — № 5. — С. 46–49.

Birkle, G. V. B. The use of a combined lining in copper production converters / *G. V. B. Birkle, V. V. Slovikovskii, T. A. Danilova [et al.]* // Refractories. — 1986. — Vol. 27, № 5–6. — P. 294–297. ■

Получено 17.12.14

© В. В. Словиковский, А. В. Гуляева, 2015 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

<p>CALL FOR PAPERS Abstracts due December 10th Hyatt Regency Vancouver ceramics.org/11cmcee</p>	<p>11th International Symposium on Ceramic Materials and Components for Energy and Environmental Applications CMCEE June 14–19, 2015</p>
<p>11-й Международный симпозиум по керамическим материалам и компонентам для энергетики и экологии</p>	
<p>14–19 июня 2015 г.</p>	<p>http://ceramics.org/</p>
<p>г. Ванкувер, Канада</p>	