

Д. Т. Н. Б. Н. Сатбаев, д. т. н. А. А. Жарменов,  
д. т. н. А. И. Кокетаев, Н. Т. Шалабаев (✉), С. Б. Сатбаев

Астанинский филиал РППГ «Национальный центр по комплексной разработке минерального сырья Республики Казахстан», г. Астана, Республика Казахстан

УДК 666.762.091.017:[620.193.93+620.178.16

## КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ СВС-ОГНЕУПОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В РАСПЛАВАХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ШЛАКОВ

Приведены результаты исследований по получению составов коррозионно-стойких огнеупоров, эксплуатируемых в агрессивных средах, в расплавах металла и шлака. Материалы получены в Астанинском филиале РППГ «НЦ КПМС РК».

**Ключевые слова:** огнеупоры, СВС-технология, коррозионная стойкость, агрессивная среда, шлаки.

**В**озрастающие требования к качеству продукции и снижению эксплуатационных затрат диктуют необходимость улучшения механических и эксплуатационных свойств огнеупорных материалов в футеровке металлургических и тепловых агрегатов. Замена традиционно используемых материалов на более стойкие, но дорогие огнеупоры не всегда экономически целесообразна.

Огнеупоры нового поколения для металлургических производств должны обладать высокими показателями: механической прочностью и коррозионной стойкостью в высокотемпературных средах различной химической природы (расплавы, шлаки, раскислители и др.), износоустойчивостью, в том числе при гидродинамических воздействиях, устойчивостью к термоциклическим воздействиям и др. Эти показатели должны обеспечивать необходимый запас стойкости огнеупорной футеровки. Создание огнеупоров нового поколения возможно на базе использования СВС-технологии, основанной на термохимическом взаимодействии двух или более компонентов исходных порошковых композиций в режиме технологического горения (СВС). При этом за очень короткие промежутки времени синтезируются жаростойкие керамические материалы с заданными эксплуатационными свойствами. Однако налаживание выпуска огнеупоров, целиком изготавливаемых из реакционно-способных компонентов, приведет к значительному их удорожанию. В этой связи представляет интерес исследование механизмов горения

СВС-шихты, приводящих в конечном итоге к сочетанию необходимых свойств огнеупорного материала в экстремальных условиях. Ввиду этого одной из важных задач является разработка огнеупорной массы, синтезируемой по СВС-технологии для футеровки сталеплавильных агрегатов. Эта масса позволила бы продлевать срок службы огнеупоров при эксплуатации в агрессивных средах, в расплавах металла и шлака [1, 2].

Детальный анализ различных методов определения стойкости огнеупоров в расплавах показал, что достаточно точную и надежную оценку ее величины можно получить при совместном использовании динамического и статического методов [3]. Динамический метод с вращением образцов в расплаве обеспечивает получение данных о кинетике процессов коррозии, статический метод с неподвижными образцами — данные о характере взаимодействия в условиях границы раздела трех фаз; совокупная оценка по обоим методам дает возможность прогнозирования стойкости в реальных условиях службы. Указанные принципы положены в основу разработанной методики комплексных высокотемпературных испытаний синтезированных по СВС-технологии огнеупоров на шлакоустойчивость [4]. Установка для проведения таких испытаний состоит из высокотемпературной электрической печи, оборудованной механизмом вращения образцов и системой автоматического регулирования температуры, обеспечивающей точность ее поддержания в пределах  $\pm 0,5$  °С.

Шлакоустойчивость огнеупора характеризуется двумя показателями: линейной скоростью коррозии ( $W$ , мм/сут) — при проведении статических испытаний; уменьшением объема погруженной в шлакомассу части образца



Н. Т. Шалабаев  
E-mail: fnc-astana@mail.ru

**Таблица 1. Характеристика синтезируемого огнеупорного материала составов № 1–3**

Показатели	№ 1	№ 2	№ 3
Состав, мас. %:			
MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	8,5	18,4	6,5
Al, АПВ-1	5,0	7,0	8,4
технический глинозем	13,4	20,7	16,7
хромитовый концентрат	20,8	Остальное	25,3
шамот	–	–	Остальное
бой изделий:			
периклазохромитовых	Остальное	–	–
хромитомагнетитовых	»	–	–
декстрин	3,0	–	–
Открытая пористость, %	2,0	1,5	1,5
Кажущаяся плотность, г/см <sup>3</sup>	3,59	3,77	3,88

**Таблица 2. Матрица планирования, экспериментальные и расчетные данные при изучении шлакоустойчивости огнеупоров состава № 1**

Номер опыта	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	X/* <sup>1</sup>	XX/* <sup>2</sup>
1	–	–	–	+	+	+	6,85	6,60
2	–	+	–	–	+	–	12,60	12,34
3	–	–	+	+	–	–	14,91	14,66
4	–	+	+	–	–	+	19,62	19,88
5	+	–	–	–	–	+	29,09	28,84
6	+	+	–	+	–	–	40,43	40,69
7	+	–	+	–	+	–	44,29	44,54
8	+	+	+	+	+	+	56,11	55,88

\*1 Средняя величина разъедания из четырех определений, об. %.  
\*2 Расчетная величина разъедания, об. %.

**Таблица 3. Матрица планирования, экспериментальные расчетные данные при изучении шлакоустойчивости огнеупоров составов № 2 и 3**

Номер опыта	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Состав № 2		Состав № 3	
				X/	XX/	X/	XX/
1	–	–	–	1,68	1,70	1,04	1,07
2	–	+	+	5,54	5,64	4,07	4,09
3	+	+	–	15,24	15,06	13,62	13,66
4	+	–	+	14,16	14,22	12,45	12,48

(ΔV, %) по объему — при проведении динамических испытаний. Печь нагревали со скоростью 150–200 град/ч до температуры испытаний, выдерживали при этой температуре в течение 5 мин. В статических условиях образцы выдерживали в расплаве в течение заданного времени неподвижно, в динамических условиях — вращали с заданной частотой, после чего их извлекали из расплава, оставляли над тиглем в течение 1 ч для стекания остатков расплава и охлаждали в выключенной печи до комнатной температуры.

Результаты определения шлакоустойчивости различных огнеупорных материалов по разработанной методике показали, что она

обеспечивает получение достаточно точных и воспроизводимых данных; ошибка определения в среднем составляет 6–8%. По разработанной методике оценивали шлакоустойчивость огнеупорных изделий, изготовленных по СВС-технологии на основе составов, содержащих сульфат магния, алюминий марки АПВ-1, бой периклазохромитовых изделий, хромитовый концентрат, технический глинозем, шамот, декстрин и алюмохромфосфатную связку. Состав огнеупоров и их некоторые свойства приведены в табл. 1.

Коррозионную стойкость огнеупоров изучали в расплаве шлака следующего состава, мас. %: SiO<sub>2</sub> 22,2, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 6,17, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 3,33, FeO

Таблица 4. Состав используемых шлаков

Шлак	Массовая доля, %				
	SiO <sub>4</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	FeO + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Конвертерный	11,12	1,23	36,95	7,16	37,83
Синтетический 1	10,00	25,00	45,00	5,00	15,00
Синтетический 2	16,11	31,90	47,44	3,47	0,38

6,91, CaO 41,7, MgO 16,50, MnO 3,19, Na<sub>2</sub>O 0,33. При проведении динамических испытаний был использован метод многофакторного планирования эксперимента со следующими интервалами варьирования факторов:  $X_1$  — температура шлакомассы  $t_{ст}$ , от 1400 (–) до 1550 °C (+),  $X_2$  — длительность испытания  $\tau$  от 16 (–) до 24 ч (+),  $X_3$  — частота вращения образцов в расплаве  $n$  от 20 (–) до 40 мин<sup>-1</sup> (+).

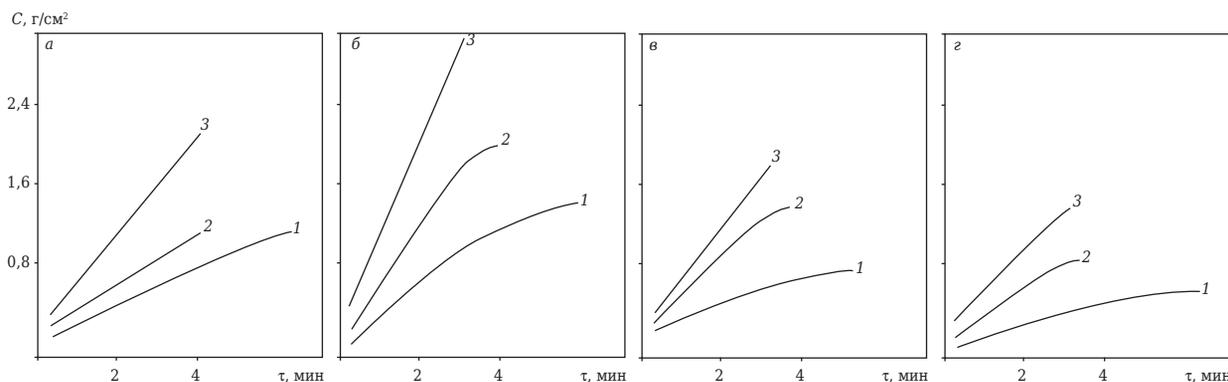
Шлакоустойчивость огнеупорных изделий состава №1 исследовали на образцах размерами 20×20×120 мм с помощью полного факторного эксперимента с общим числом опытов  $2^n = 2 \cdot 3 = 6$ , где  $n$  — число факторов. Обработка полученных результатов показала, что коэффициенты при взаимодействующих факторах ( $X_1X_2$ ,  $X_1X_3$ ,  $X_2X_3$ ) в рассчитанном уравнении регрессии оказались незначимыми. В связи с этим в проведенном исследовании на огнеупорах составов № 2 и 3 была использована полуреплика полного факторного эксперимента с числом опытов для каждого материала  $2^{n-1} = 2^{3-1} = 4$ . Уравнения регрессии, полученные при этом, не учитывают эффекты взаимодействия факторов, которые, как показано на примере состава №1, в данных интервалах варьирования незначимы.

Матрицы планирования, экспериментальные и расчетные данные приведены в табл. 2 (для состава №1) и табл. 3 (для составов №2 и 3). На основании экспериментальных данных были рассчитаны следующие уравнения регрессии: состав №1:  $y = 27,93 + 14,56X_1 + 4,27X_2 + 5,18X_3$ , состав №2:  $y = 9,16 + 5,54X_1 + 1,23X_2 + 0,68X_3$ , состав №3:  $y = 7,90 + 5,24X_1 + 1,05X_2 + 0,47X_3$ , где  $y$  — уменьшение объема погруженной в расплав частицы образца во время испытания, %. Статистический анализ полученных результатов показал, что процесс коррозии образцов испытуемых огнеупоров адекватно описывается рассчитанными линейными уравнениями регрессии в выбранных интервалах варьирования независимых переменных. Анализ полученных результатов свидетельствует, что из исследованных факторов наибольшее влияние на коррозию огнеупоров в расплаве шлака оказывает температура, причем степень ее влияния несколько возраста-

ет при увеличении содержания Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. В стандартных условиях испытаний ( $t_{ст} = 1500$  °C,  $n = 20$  мин,  $\tau = 24$  ч при температуре расплава 1400 °C) повышение содержания в огнеупоре Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> от 3 до 15 % увеличивает шлакоустойчивость огнеупоров в 3,6 раза, при температуре расплава 1000 °C — в 3 раза. В процессе последующих испытаний огнеупоров в расплаве шлака в динамическом режиме при  $t_{ст} = 1500$  °C,  $n = 20$  мин,  $\tau = 24$  ч на образцах размерами 11×11×80 мм установлены усредненные величины коррозионной стойкости. Эти величины составляют: для состава №1 22 об. %, №2 27 об. %. Погрешность определений во всех экспериментах в пределах ± 1 %.

Исследовали также шлаковый износ огнеупорных образцов с содержанием Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2,0, 2,5, 3,0, 3,5, 4,0, 5,0, 7,0, 10,0, 13,0 и 15,0 % в контакте с конвертерным и синтетическими шлаками. Состав шлаков приведен в табл. 4, шлаковая нагрузка — 20 г шлака на 1 см<sup>2</sup> поверхности контакта огнеупора с шлаком. Полученные результаты показаны на рисунке. Ход кривых износа огнеупора показывает, что во всех случаях растворение протекает в диффузионной области. Независимо от содержания Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с большой скоростью материал огнеупора растворяется в синтетическом шлаке 2, с минимальной скоростью — в контакте с конвертерным шлаком. По содержанию Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> кривые износа можно разбить на участки, на которых износ может быть выражен в виде линейных зависимостей со значениями коэффициента корреляции по модулю от 0,64 до 0,83.

В контакте с конвертерным шлаком при содержании Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в огнеупоре от 2,0 % и более степень износа огнеупора увеличивается и достигает максимального значения при содержании в огнеупоре 5,0 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Далее до содержания Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 10,0 % износ уменьшается незначительно — с коэффициентом 0,019, при содержании Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> более 10,0 % происходит более резкое снижение шлаковой коррозии — с коэффициентом 0,092 (табл. 5). В контакте с синтетическими шлаками максимум износа отмечается при содержании Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 8,0–10,0 %. С большой скоростью материал огнеупора растворяется в контакте с синтетическим шлаком 2, что является следствием присутствия



Кривые износа  $C$  огнеупора, содержащего 2,0 (а), 5,0 (б), 10,0 (в) и 15 (г) %  $Al_2O_3$ , в шлаковом расплаве: 1 — конвертерный шлак; 2 — синтетический шлак 1; 3 — синтетический шлак 2

Таблица 5. Зависимость шлакоустойчивости футеровки от содержания  $Al_2O_3$  в огнеупоре и продолжительности взаимодействия

Шлак	Продолжительность взаимодействия, мин	Интервал значений содержания $Al_2O_3$ в огнеупоре (x), %	Уравнение зависимости количества перешедшего в расплав огнеупора (Y) от содержания (x), $g/cm^2$	Коэффициент корреляции	Среднеквадратичное отклонение, $g/cm^2$
Конвертерный	5,0	$2,0 < x < 5,0$	$Y = 0,021x + 0,710$	0,64	0,12
		$5,0 < x < 10,0$	$Y = 0,019x + 1,971$	-0,78	0,05
		$10,0 < x < 15,0$	$Y = -0,092x + 4,642$	-0,80	0,18
Синтетический 1	1,5	$2,0 < x < 10,0$	$Y = 0,010x + 0,291$	0,82	0,04
		$10,0 < x < 15,0$	$Y = -0,038x + 2,120$	-0,80	0,07
Синтетический 2	3,0	$2,0 < x < 10,0$	$Y = 0,017x + 0,617$	0,74	0,10
	1,5	$10,0 < x < 15,0$	$Y = -0,069x + 3,965$	-0,79	0,14
3,0		$2,0 < x < 10,0$	$Y = 0,016x + 0,495$	0,74	0,09
		$10,0 < x < 15,0$	$Y = -0,070x + 3,731$	-0,79	0,16
Синтетический 2	1,5	$2,0 < x < 10,0$	$Y = 0,034x + 0,983$	0,74	0,20
		$10,0 < x < 15,0$	$Y = -0,145x + 7,744$	-0,83	0,30

в нем  $SiO_2$ , ускоряющего распределение растворяющегося кремнезема в объеме шлака и тем самым увеличивающего скорость растворения огнеупора.

Таким образом, износ огнеупора при контакте с конвертерным и синтетическими шлаками происходит путем растворения с его поверхности; проникновение компонентов шлака в глубь огнеупора незначительно. В контакте с конвертерным шлаком наименьшей стойкостью (в пределах составов исследованных материалов) обладают массы с содержанием  $Al_2O_3$  5,0 %, в случае синтетических шлаков максимум износа смещается в область масс с содержанием  $Al_2O_3$  8,0–10,0 %. Растворение материала огнеупора в воздействующем расплаве

протекает в диффузионной области. Большая скорость растворения огнеупора в синтетическом шлаке 2 объясняется присутствием в нем кремнезема. Зависимость износа огнеупора от содержания в нем  $Al_2O_3$  может быть представлена в виде кусочно-линейной функции со значениями коэффициента корреляции по модулю от 0,64 до 0,83.

Для повышения стойкости в контакте с конвертерным шлаком необходимо использовать полуокислые материалы с содержанием  $Al_2O_3$  менее 5,0 % или составы с содержанием  $Al_2O_3$  более 10,0 %. Алюмосиликатные материалы с содержанием  $Al_2O_3$  2–15 % не могут быть рекомендованы для службы в контакте с синтетическими шлаками.

**Библиографический список**

1. **Исмаилов, М. Б.** Докторская диссертация, Алма-Ата, ИПГ, 1992.  
 2. **Заявка 4380806/23-33/029414 СССР.** Огнеупорная набивная масса для футеровки / Ксандопуло Г.И., Исмаилов М. Б. и др.; опубл. 01.03.88.  
 3. **Мержанов, А. Г.** Самораспространяющийся высокотемпературный синтез, состояние и перспек-

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.

**Д**ля 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