

Д. т. н. **А. З. Исагулов**, к. т. н. **В. Ю. Куликов** (✉), к. т. н. **С. С. Квон**,
доктор PhD **А. М. Достоева**, доктор PhD **Е. П. Щербакова**

Карагандинский государственный технический университет (КарГТУ),
г. Караганда, Республика Казахстан

УДК 666.76.017:620.186

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ОГНЕУПОРНЫХ ИЗДЕЛИЙ НА ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА

Рассмотрено влияние структуры огнеупорных изделий на такие эксплуатационные свойства, как шлакоустойчивость и термостойкость. В качестве образцов использовали обычный шамотный огнеупор (эталон) и шамотный огнеупор, изготовленный по новой технологии с применением нестационарного давления прессования. Показано, что пористость, шлакоустойчивость и термостойкость изделий, изготовленных с использованием нестационарного давления, выше, чем у эталона.

Ключевые слова: шамотный огнеупор, футеровка плавильной печи, нестационарное давление прессования, пористая структура, шлакоустойчивость, термостойкость.

ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатационные свойства огнеупоров, используемых в качестве футеровки, во многом определяют не только производительность металлургических агрегатов, но и качество готовой продукции. Одними из основных эксплуатационных свойств огнеупоров для футеровки плавильных печей являются шлакоустойчивость и термостойкость, которые зависят как от химического состава расплава (шлака), так и от структуры и состава самого огнеупора [1]. Очевидно, что плотная структура огнеупора с точки зрения этих свойств будет препятствовать проникновению расплава вглубь футеровки и тем самым снижать риск ее разрушения. С другой стороны, совершенно беспористое изделие имеет значительную массу, что также нежелательно. Следовательно, идеальная структура огнеупора для обеспечения оптимальных эксплуатационных свойств — пористая закрытого типа, что, с одной стороны, обеспечивает минимальную массу огнеупорного изделия, а с другой — препятствует проникновению расплава и разрушению огнеупора.

Ранее проведенные исследования режимов прессования и спекания огнеупоров позволили определить условия [2], которые обеспечивают получение структуры огнеупора, достаточно близкой к идеальной. Предлагается использовать переменное давление прессования, позволяющее формировать достаточно однородную

структуру, которая при правильно подобранном режиме спекания создает пористость закрытого типа. Определены параметры технологии изготовления шамотных огнеупоров с оптимальной пористостью и высокой термостойкостью. Состав огнеупорной массы, %: шамот фракции 2,5–3,0 мм 55, фракции 0,1–0,3 мм 5,5, глинистая суспензия 39,5. Влажность массы 3–4 %. Прессование следует проводить в течение 12 с, базовым (начальным) является давление 22 МПа, которое через 7–8 с повышают до 27 МПа. Спекание проводят при температуре 1250–1270 °С в течение 12 ч. Пористую структуру образцов исследовали методом ртутной порометрии на порозиметре системы Pascal Pore Master 60. Результаты исследований показаны на рис. 1.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Сравнение пористой структуры эталона и образца, полученного по предложенным режимам прессования и спекания, говорит в пользу последнего. Как видно из рис. 1, характер распределения пор по размерам меняется в зависимости от характера прилагаемой нагрузки. При переменной нагрузке кривая распределения пор по размерам сдвигается в сторону меньших пор. Исследования показали, что наибольший объем пор при приложении переменной нагрузки находится в пределах 0,1–0,3 мкм, в то время как для эталона эта величина составляет 0,7–1,0 мкм. Очевидно, что уменьшение среднего размера пор и перераспределение объема пор в сторону мелких пор являются благоприятными факторами, способствующими снижению проникновения шлака в поры и тем самым повышению шлакоустойчивости огнеупора.



В. Ю. Куликов
E-mail: mlpikm@mail.ru

Из опытных образцов и эталона были изготовлены пробы для определения шлакоустойчивости. Для этого в образцах просверливали цилиндрические отверстия диаметром 15 и глубиной 35 мм. В отверстие засыпали шлак, образующийся после выплавки стали марки 35ХМФЛ в дуговой сталеплавильной печи. Далее полученные пробы устанавливали в печь Nabertherm LHT и выдерживали при 1550 °С (шлак находился в расплавленном состоянии) в течение 4 ч. После полного охлаждения пробы разрезали по сечению (010) и изучали глубину проникновения шлака при 50-кратном увеличении. Проникновение шлака определяли в пяти точках (табл. 1). Точки для определения глубины проникновения располагались радиально вокруг центральной точки. Как видно из табл. 1, глубина проникновения шлака в эталоне выше и составляет в среднем 3,91 мм, в опытном образце 2,19 мм. Таким образом, данный показатель улучшается почти на 40 %.

Принципиальным различием между эталоном и опытным образцом является также характер изменения шлакоустойчивости в зависимости от зоны отбора пробы. Для эталона разница между глубиной проникновения в центре и на периферии составляет около 9 %, для опытного образца — всего лишь 4 % (рис. 2). Образец испытаний показан на рис. 3. Такая разница в глубине проникновения объясняется неравномерностью структуры огнеупора. Для эталона (получен при постоянном давлении прессования) характерно неравномерное распределение плотности и пор по объему, в то время как в опытном образце разница в плотности и пористости в центре и на периферии нивелируется за счет использования нестационарного давления. Такая же тенденция наблюдалась при использовании в качестве проникающего расплава шлака, образовавшегося при плавке серого чугуна марки СЧ25. Для эталона среднее значение глубины проникновения шлака в образец составило 1,14 мм, для опытного образца 0,95 мм. Причем для эталона разница в глубине проникновения между центром и периферией составляла около 8 %, для опытного образца 3 %.

Проведенные исследования на шлакоустойчивость и пористость показали, что эталон, изготовленный при постоянном давлении прессования, содержит на поверхности значительно более крупные поры, чем опытный образец, что обеспечивает более легкое и глубокое проникновение шлака. Следовательно, использование вариативной нагрузки при прессовании способ-

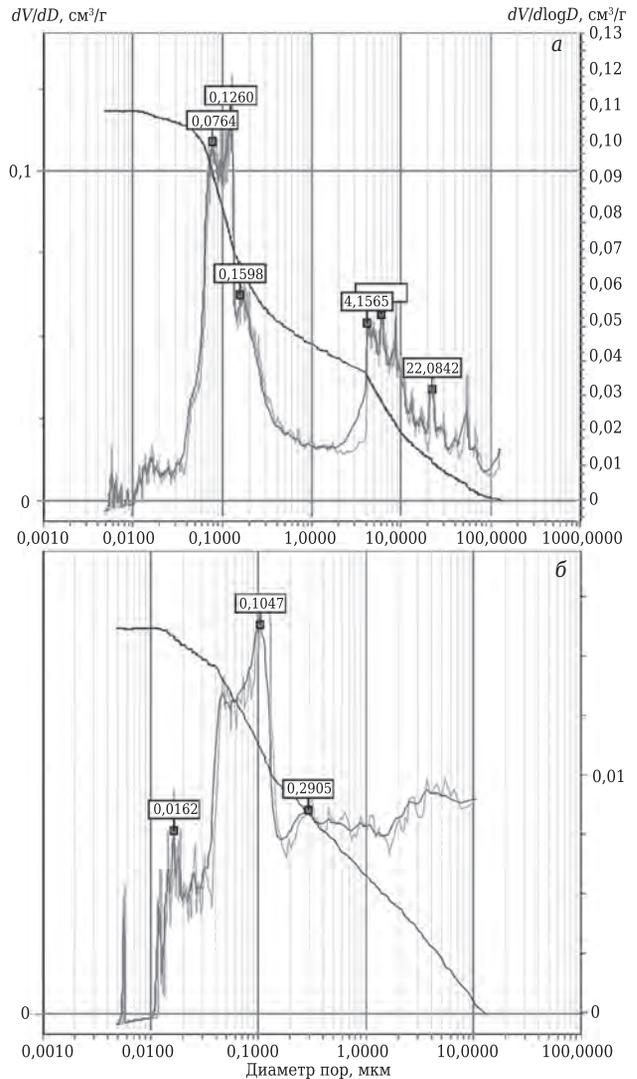


Рис. 1. Распределение пор по размерам в шамотном огнеупоре, полученном при обычном режиме (а) и переменной нагрузке (б)

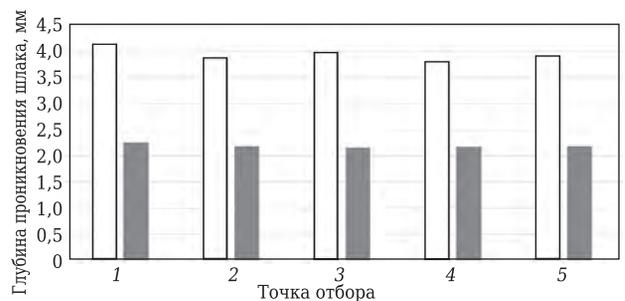


Рис. 2. Диаграмма изменения шлакоустойчивости в зависимости от зоны отбора пробы в пяти точках (1–5, см. табл. 1): □ — эталон; ■ — опытный образец

Таблица 1. Определение глубины проникновения шлака, мм

Образец	Точка 1 (центр)	Точка 2 (10 см от центра)	Точка 3 (10 см от центра)	Точка 4 (10 см от центра)	Точка 5 (10 см от центра)	Среднеарифметическое
Эталон	4,14	3,87	3,98	3,81	3,76	3,91
Опытный	2,26	2,19	2,16	2,17	2,17	2,19

ствуется снижению размера и количества открытых пор, что, в свою очередь, приводит к повышению шлакоустойчивости огнеупора.

Как известно [3, 4], на термостойкость футеровки влияет не только качество самой футеровки, но и природа расплава. В этой связи исследовали влияние состава расплава на тер-

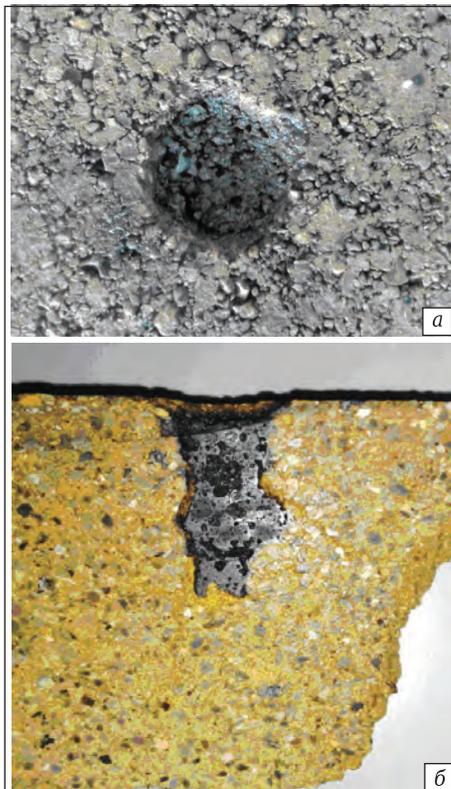


Рис. 3. Образец после испытаний на шлакоустойчивость: а — поверхность образца; б — проникновение шлака в образец



Рис. 4. Опытный образец после нескольких погружений в расплав для определения термостойкости

мостойкость огнеупоров, изготовленных с использованием нестационарного давления. Для этого образцы огнеупоров погружали в расплав различного состава (табл. 2). Образцы для испытаний в виде цилиндров высотой 80 и диаметром 30 мм (рис. 4) формовали в специальных гильзах с использованием нестационарного давления в соответствии с вышеуказанным режимом, а затем спекали при 1250 °С. Термостойкость образцов определяли количеством погружений в расплав чугуна СЧ25, углеродистой или легированной стали 35ХМФЛ при 1450 °С при сохранении целостности образца. Длительность пребывания в расплаве составляла 15 мин, после чего образец извлекали. После охлаждения до комнатной температуры образец вновь погружали в расплав; разрушение образца означало предел его термостойкости. Ниже приведены данные по термостойкости опытного образца в зависимости от природы расплава:

Марка расплава..	СЧ25	Сталь 40 или углеродистая	35ХМФЛ
Число погружений.....	26	21	18

Как видно, наименьшей термостойкостью обладает образец, погруженный в расплав легированной стали. Следует отметить, что при температуре эксперимента исследуемые расплавы обладают разной жидкотекучестью. Очевидно, что жидкотекучесть сильно влияет на термостойкость огнеупора, так как высокая жидкотекучесть способствует проникновению расплава в поры футеровки. Поэтому, вероятно, когда говорят о влиянии состава расплава на термостойкость футеровки, имеют в виду его жидкотекучесть.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение нестационарного давления при прессовании и предлагаемого режима спекания в процессе изготовления огнеупорного изделия для футеровки плавильных печей позволяет получить равномерную пористую структуру закрытого типа и однородную плотность изделия, что повышает его шлакоустойчивость.

На данном этапе исследований можно утверждать, что при одинаковой температуре расплав легированной стали оказывает менее отрицательное воздействие на термостойкость огнеупора, чем чугун или углеродистая сталь. Вопрос, какой именно из факторов — состав

Таблица 2. Химический состав расплавов, применяемых для оценки термостойкости огнеупоров, %

Расплав	C	Si	Mn	S	P	Fe	Ni	Cr	Cu	Mo	V
Чугуна СЧ25	3,2–3,4	1,4–2,2	0,7–1,0	0,15	0,2	Ост.	–	–	–	–	–
Сталь:											
40	0,36–0,44	0,17–0,37	0,5–0,8	0,035	0,035	»	0,2	0,8–1,1	0,3	–	–
35ХМФЛ	0,3–0,4	0,2–0,4	0,4–0,9	0,04	0,03	»	0,3	0,8–1,1	0,2	0,08–0,12	0,06–0,12

или жидкотекучесть имеет большее влияние на термостойкость огнеупора, является предметом дальнейших исследований.

Библиографический список

1. **Каппель, Ю.** Черная металлургия: связь между огнеупорами, шлаком и сталью / Ю. Каппель // Новые огнеупоры. — 2008. — № 11. — С. 66–77.

2. **Исагулов, А. З.** Влияние технологических параметров на изготовление шамотных кирпичей с оптимальной пористостью / А. З. Исагулов, В. Ю. Куликов, Св. С. Квон [и др.] // Огнеупоры и техническая керамика. — 2018. — № 1/2. — С. 31–35.

3. **Соков, В. Н.** Шамотные теплоизоляционные материалы с повышенной термостойкостью / В. Н. Соков, В. В. Соков, А. Э. Бегляров // Приволжский научный журнал. — 2011. — № 2. — С. 38–42.

4. **Гладких, И. В.** Огнеупорные шамотные изделия на основе техногенного сырья для футеровки тепловых агрегатов литейно-металлургического производства / И. В. Гладких // Изв. вузов. Черная металлургия. — 2017. — Т. 60, № 11. — С. 857–861. ■

Получено 01.06.18

© А. З. Исагулов, В. Ю. Куликов, С. С. Квон, А. М. Достаева, Е. П. Щербакова, 2018 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



HT-CMC/10th
22–26 сентября 2019 г. Бордо, Франция
10th International Conference on High Temperature Ceramic Matrix Composites
ht-cmc10.org

**10-я МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПО ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ КЕРАМИЧЕСКИМ
МАТРИЧНЫМ КОМПОЗИТАМ (HTCМС)**



ТЕМАТИКА:

- Расчетное моделирование, моделирование и проектирование новых материалов и процессов
- Волокна и преформы
- Интерфейсы и межфазные связи
- Инновационный дизайн, передовые технологии обработки и производства HTCМС
- Перспективные технологии производства HTCМС: трехмерная печать, лазерное спекание и др.
- Материалы для экстремальных условий:
 - сверхвысокотемпературная керамика (УНТС)
 - нанонаполненные тернарные карбиды и нитриды (МАХ-фазы)
- Термические и экологические барьерные покрытия
- Полимерная керамика и композиты (включая армированные пены)
- Углерод / углеродные композиты
- Термомеханическое поведение и производительность HTCМС
- Неразрушающий контроль и мониторинг качества керамических композитов
- Применение HTCМС
- Передовые материалы для устойчивой энергетики (включая ядерное деление и слияние, промышленные газовые турбины)



