

Д. т. н. **В. А. Соколов**¹ (✉), д. т. н. **М. Д. Гаспарян**², к. т. н. **С. С. Киров**¹

¹ ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

² ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева», Москва, Россия

УДК 666.762.5.046.512.002.2

ПЛАВЛЕНОЛИТЫЕ ВЫСОКОЦИРКОНИЕВЫЕ ОГНЕУПОРЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ПРОИЗВОДСТВА

Приведена характеристика плавленоолитых высокоциркониевых огнеупоров, содержащих более 72 % ZrO_2 , синтезированных на основе систем $ZrO_2-Al_2O_3-SiO_2$ и ZrO_2-SiO_2 . Материалы системы $ZrO_2-Al_2O_3-SiO_2$ с содержанием SiO_2 10–13 % характеризовались крайне низкой коррозионной стойкостью в расплавах промышленных стекол вследствие высокого содержания стеклофазы и разобшенности кристаллов бадделеита. Коррозионная стойкость материалов с содержанием SiO_2 4–7 % в расплаве натрийкальцийсиликатного стекла незначительно превышает стойкость огнеупора Бк-41. Повышению термостойкости огнеупоров способствуют снижение содержания SiO_2 до менее 4,5 %, а также образование кубической модификации ZrO_2 при введении в состав огнеупора оксида кальция. Высокие затраты на производство и сложность технологии огнеупоров с содержанием ZrO_2 более 90 % ограничивают их производство и применение.

Ключевые слова: плавленоолитые высокоциркониевые огнеупоры, электродуговая печь, коррозионная стойкость, стекло E, боросиликатное стекло, натрийкальцийсиликатное стекло.

В условиях воздействия ряда высокотемпературных и агрессивных минеральных расплавов, в первую очередь стекольных, традиционные бадделеитокорундовые огнеупоры уже не обеспечивают требуемую стойкость футеровки печей, что сокращает срок их службы. Одним из направлений повышения коррозионной устойчивости, по данным публикаций в отечественной и зарубежной литературе, является увеличение в их составе содержания диоксида циркония.

Бадделеитокорундовые материалы по масштабам производства и применения занимают первое место среди плавленоолитых огнеупоров и имеют исключительно большое значение для стекольной промышленности. Эти огнеупоры содержат от 32 до 41 % ZrO_2 , и поэтому поиск огнеупоров с повышенной коррозионной стойкостью целесообразно вести в высокоциркониевой области системы $ZrO_2-Al_2O_3-SiO_2$. Представляют интерес также материалы в высокоциркониевой области системы ZrO_2-SiO_2 , по свойствам которых имеется только ограниченная информация [1, 2].

В ранних исследованиях плавленоолитых огнеупоров системы $ZrO_2-Al_2O_3-SiO_2$ с содержанием ZrO_2 до 60 % показано [3–8], что увеличение их коррозионной стойкости наблюдается только в пределах до 50 % ZrO_2 ; дальнейшее повышение содержания ZrO_2 снижает стойкость таких огнеупоров и приводит к резкому возрастанию их стоимости и усложнению технологии производства. При этом следует отметить, что недостаточная мощность отечественных плавильных установок в указанном периоде исследований не позволяла получать расплавы с содержанием ZrO_2 более 60 %, а науглероживание расплава значительно снижало коррозионную стойкость плавленых материалов. Создание плавильных установок ЭДП-450 и ЭДП-600 [9] позволило не только синтезировать материалы разных оксидных систем с содержанием ZrO_2 70–95 %, но и проводить плавки в окислительном режиме.

Учитывая объемное изменение диоксида циркония при высоких температурах и необходимость присутствия в структуре огнеупоров некоторого количества стеклофазы, первый этап исследований материалов системы $ZrO_2-Al_2O_3-SiO_2$ осуществляли при следующем содержании компонентов, %: ZrO_2 72–83, Al_2O_3 4–14, SiO_2 10–13, Na_2O 0,8–1,2 (табл. 1). По содержанию SiO_2 и Na_2O стеклофаза в этих материалах соответствовала типичному составу для бадделеитокорундовых огнеупоров Бк-33 и Бк-41.



В. А. Соколов
E-mail: sokolov235@yandex.ru

Таблица 1. Состав и свойства плавнелитых огнеупоров системы $ZrO_2-Al_2O_3-SiO_2$

Огнеупор	Химический состав, %				Фазовый состав*	Кажущаяся плотность, кг/см ³	Степень коррозии, об. %
	ZrO ₂	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Na ₂ O			
С содержанием SiO ₂ 10–13 %							
ВЦ-110	72,1	13,6	12,3	0,86	Б + М + С	4,1	100,0
ВЦ-112	82,9	4,3	12,0	0,80	Б + С	4,4	100,0
ВЦ-113	83,0	4,5	11,9	0,79	Б + С	4,4	100,0
ВЦ-116	83,6	5,4	10,1	0,80	Б + С	4,5	100,0
Бк-41	41,3	44,0	13,0	1,22	Б + (Б + К) + С	3,7	28,5
С содержанием SiO ₂ 4–7 %							
ВЦ-119	76,1	18,5	4,3	0,4	Б + К + С	4,5	23,6
ВЦ-118	77,3	16,3	5,6	0,6	Б + К + С	4,6	23,3
ВЦ-117	89,0	2,8	7,0	0,5	Б + С	4,7	27,7
ВЦ-147	90,5	5,0	4,3	0,2	Б + С	4,9	24,7
* Б — бадделит; М — муллит; К — корунд; С — стеклофаза.							

* Б — бадделит; М — муллит; К — корунд; С — стеклофаза.

Высокоциркониевые материалы получали плавкой в электродуговой печи ЭДП-450 и литьем расплава в графитовые и песчаные формы с последующим отжигом отливок в камерной электрической печи по заданному температурному режиму. Плавки высокоциркониевых огнеупоров, содержащих более 70 % ZrO₂, показали непригодность песчаных форм при естественном отжиге в термоящиках из-за растрескивания и значительного пригара отливок. Только некоторые отливки с содержанием ZrO₂ 72–83 % удалось получить без трещин, применяя режим искусственного отжига, начиная с температуры 1450 °С [7].

Структура материалов системы ZrO₂–Al₂O₃–SiO₂ с содержанием SiO₂ 10–13 %, по данным петрографического анализа, представляет собой кристаллическую основу, разобленную стеклофазой. Кристаллическая часть огнеупоров в зависимости от их состава характеризуется разным

качественным и количественным содержанием компонентов. Структурными составляющими образцов огнеупора ВЦ-110 являются бадделит, муллит и стеклофаза (см. табл. 1, рис. 1, а). Уменьшение содержания Al₂O₃ приводит к образованию структуры, состоящей только из бадделита и стеклофазы (рис. 1, б). Характерным для всех образцов этой серии является высокое содержание стеклофазы (> 30 об. %). Повышенное количество стеклофазы связано с различием плотности стеклофазы (плотность SiO₂ 2,5 г/см³) и компонентов кристаллической фазы (плотность муллита 3,0, корунда 4,0 и бадделита 5,6 г/см³) [6].

Увеличение в огнеупоре содержания ZrO₂ приводит к относительному увеличению объема, занимаемого стеклофазой в материале, по сравнению с кристаллической фазой, формируемой в основном бадделитом. Структура образцов огнеупоров ВЦ-112, ВЦ-113 и ВЦ-116 представляет

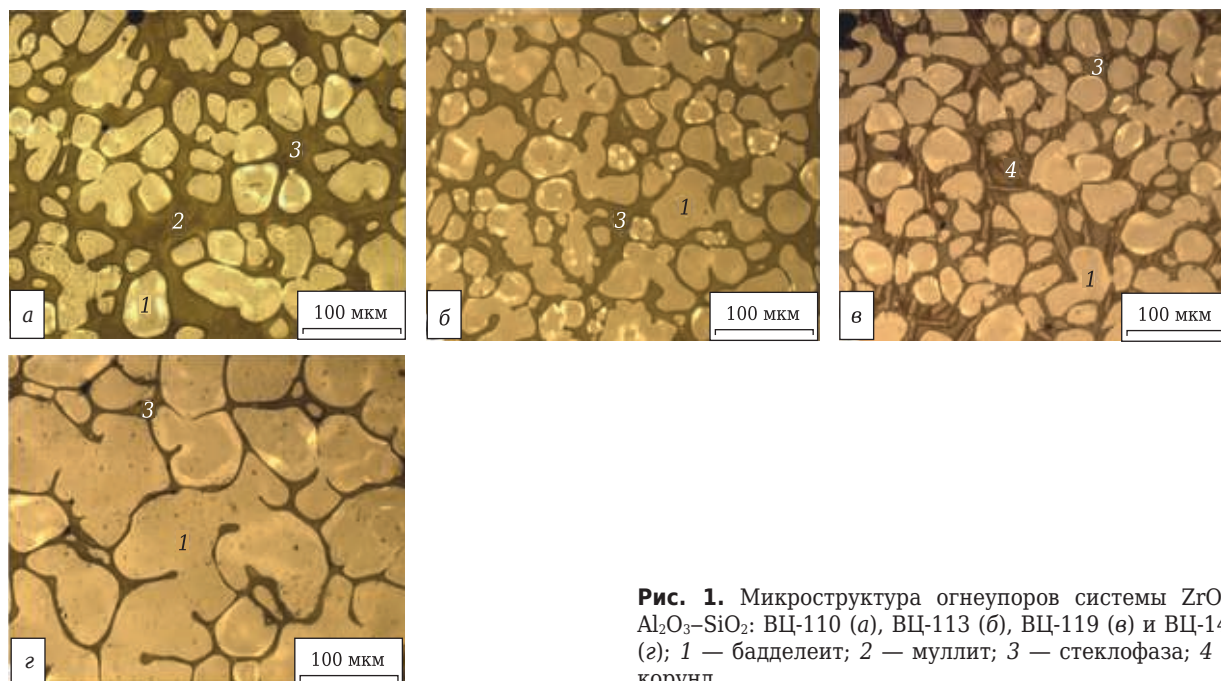


Рис. 1. Микроструктура огнеупоров системы ZrO₂–Al₂O₃–SiO₂: ВЦ-110 (а), ВЦ-113 (б), ВЦ-119 (в) и ВЦ-147 (г); 1 — бадделит; 2 — муллит; 3 — стеклофаза; 4 — корунд

собой двухфазную систему, состоящую только из кристаллов бадделеита, разобщенных стеклофазой. При этом отмечается структурная неоднородность материала. Зона закалки формируется небольшими скелетными кристаллами бадделеита. Мелкие зерна имеют овальную форму, более крупные (0,06–0,08 мм) характеризуются извилистыми контурами. Центральная зона отливки сложена крупными овальными и округлыми зернами бадделеита (размерами до 0,3 мм) и стеклофазой.

Структура огнеупоров второй серии с 4–7 % SiO_2 при высоком содержании Al_2O_3 (образцы ВЦ-119 и ВЦ-118) кроме бадделеита включает кристаллы корунда (см. табл. 1, рис. 1, в). В образцах с низким содержанием Al_2O_3 (ВЦ-117 и ВЦ-147) и переходом его в стеклофазу кристаллическую часть составляют только зерна бадделеита (рис. 1, г). Содержание стеклофазы в образцах этой серии даже при низком содержании кремнезема в разных зонах отливки достигает 20 %, однако при этом их структура характеризуется частичным взаимным срастанием зерен бадделеита. На отдельных участках прослойки стеклофазы, весьма небольшие по толщине, в ее составе также отмечено присутствие мельчайших зерен бадделеита. По этим причинам высокоциркониевые материалы второй серии характеризуются большей коррозионной стойкостью, чем первой (см. табл. 1).

Коррозионные испытания огнеупоров составов 72–82 % ZrO_2 и 10–13 % SiO_2 в динамических условиях показали их крайне низкую стойкость в натрийкальцийсиликатном стекле. Все образцы этих огнеупоров после испытаний в течение 24 ч при 1500 °С полностью разрушились; их степень коррозии принята за 100 %. При этом степень коррозии огнеупора Бк-41 составляла 28,5 об. %. Огнеупоры с пониженным содержанием кремнезема (ВЦ-119, ВЦ-118, ВЦ-117 и ВЦ-147) в расплаве натрийкальцийсиликатного стекла имели коррозионную стойкость, незначительно превышающую стойкость огнеупора Бк-41 (см. табл. 1).

Приведенная структурная характеристика огнеупорных материалов и данные табл. 1 свидетельствуют, что даже при значительном содержании в их составе диоксида циркония коррозионная стойкость огнеупоров остается низкой. Главные причины этого кажущегося противоречия — увеличение контактной поверхности

стеклофазы, взаимодействующей с расплавом стекла (ВЦ-110, ВЦ-112, ВЦ-113 и ВЦ-116), и разобщенность кристаллов бадделеита в стеклофазе (ВЦ-119, ВЦ-118, ВЦ-117 и ВЦ-147), являющейся матрицей огнеупорного материала. Присутствие в огнеупоре муллита при отсутствии целостной структуры материала также снижает его коррозионную стойкость. Муллит под воздействием расплавленной стекломассы разлагается на корунд и стеклофазу. Образование вторичной стеклофазы способствует еще большему разобщению зерен бадделеита и снижению коррозионной стойкости огнеупора.

Следующий объект исследований — высокоциркониевая область системы ZrO_2 – SiO_2 . При этом учитывалось, что кроме высокого содержания ZrO_2 в огнеупорах при низком содержании стеклофазы важным требованием является устранение объемных полиморфных изменений ZrO_2 при нагревании и охлаждении, ведущих к разрушению изделий. Предварительный синтез материалов системы ZrO_2 – SiO_2 (образцы огнеупоров ЦИ-12, ЦИ-13, ЦИ-14, ЦИ-15, табл. 2) проводили в высокочастотной индукционной печи по методике, описанной в публикации [1]. Огнеупоры ВЦ-1 и ВЦ-3 получали плавлением в электродуговой печи ЭДП-600. Для устранения полиморфных объемных изменений и перевода ZrO_2 в кубическую форму в состав шихт для плавления вводили CaO и определяли верхний предел содержания кремнезема, обеспечивающий стабилизацию диоксида циркония.

Петрографические исследования всех материалов показали, что их структура сформирована кристаллами диоксида циркония, разобщенными стеклофазой. Размер кристаллов ZrO_2 зависит от состава материала и имеет четкую тенденцию к возрастанию при снижении в огнеупоре количества кремнезема. Характерная микроструктура плавленных материалов ЦИ-15 и ВЦ-3 с минимальным содержанием SiO_2 показана на рис. 2.

По результатам дилатометрических испытаний, проведенных по известной методике [10], эффект стабилизации достигается в материалах ЦИ-14, ЦИ-15 и ВЦ-3 с содержанием SiO_2 менее 4,5 % (рис. 3, г–е). При большем количестве кремнезема в материалах (~9 %) CaO является компонентом стеклофазы и стабилизирующего действия на ZrO_2 не оказывает (рис. 3, а, б). Результаты

Таблица 2. Состав и свойства плавнелитых огнеупоров системы ZrO_2 – SiO_2 – CaO

Огнеупор	Химический состав, %				Кажущаяся плотность, г/см ³
	ZrO_2	SiO_2	CaO	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$	
ЦИ-12	79,1	14,0	6,9	0,6	4,8
ЦИ-13	83,1	9,2	7,2	0,5	4,9
ЦИ-14	87,6	4,5	7,5	0,4	5,3
ЦИ-15	91,6	0,2	7,8	0,4	5,5
ВЦ-1	91,2	6,2	0,6	2,0	5,4
ВЦ-3	91,7	0,3	7,2	0,8	5,5

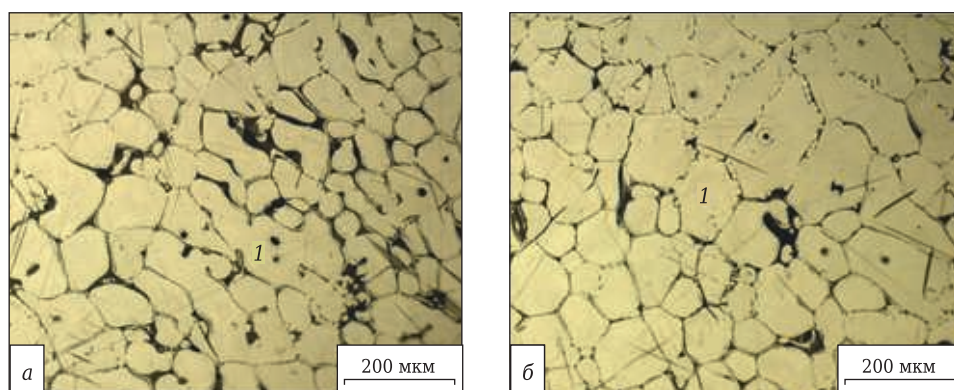


Рис. 2. Микроструктура плавленных материалов системы ZrO_2-SiO_2-CaO ЦИ-15 (а) и ВЦ-3 (б); 1 — ZrO_2 куб

рентгенографических исследований подтверждают, что ZrO_2 образца ЦИ-13 относится к моноклинной модификации (0,3164, 0,2844 и 0,2607 нм), а образца ЦИ-14 — к кубической модификации (0,2950, 0,1814, 0,1542, 0,1484 и 0,2564 нм). Высокую степень стабилизации ZrO_2 имеет также огнеупор электродуговой плавки ВЦ-3, на кривой которого отсутствует петля гистерезиса, характерная для материалов бадделеитового состава (см. рис. 3, е). Отсутствие петли гистерезиса свидетельствует о возможности получения плавленолитых высокоциркониевых огнеупоров ($SiO_2 \leq 4,5\%$) с повышенной термостойкостью.

Приведенные результаты свидетельствуют, что только материалы с низким содержанием SiO_2 могут рассматриваться в качестве перспективных для изготовления огнеупоров, работающих на контакте с агрессивными расплавами. Так, по результатам коррозионных испытаний [11, 12], стойкость огнеупора ВЦ-117 в расплавах боросиликатного и фосфатного стекла, применяемых при иммобилизации радиоактивных отходов, выше, чем огнеупора Бк-33, в 2–3 раза. По данным [13], плавленный высокоциркониевый огнеупор Б-90 (ZrO_2 88,8 %, SiO_2 6,5 %, Al_2O_3 3,4 %, Na_2O 0,9 %) в 6 раз превосходит огнеупоры Бк-33

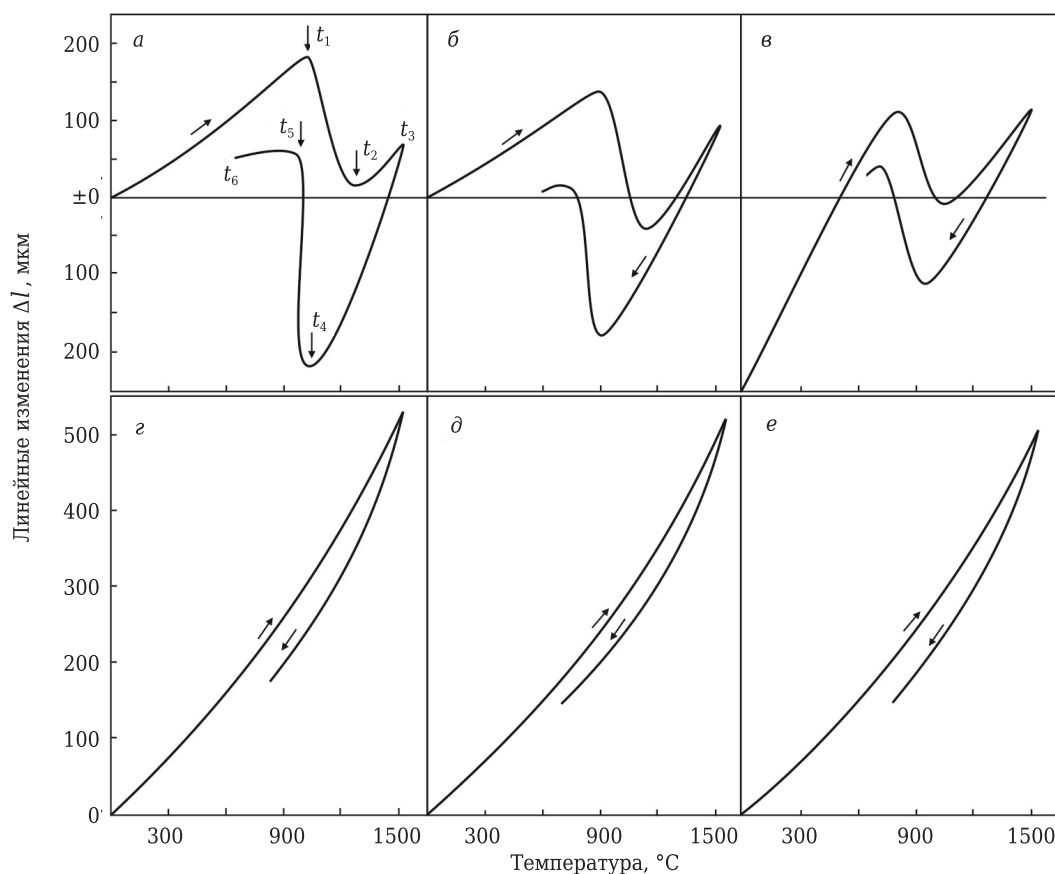


Рис. 3. Дилатометрические кривые образцов огнеупоров ЦИ-12 (а), ЦИ-13 (б), ВЦ-1 (в), ЦИ-14 (г), ЦИ-15 (д) и ВЦ-3 (е)

и ER 1711 по коррозионной стойкости в расплаве боросиликатного стекла Е.

Следует отметить, что плавнелитые высокоциркониевые огнеупоры могут быть использованы в высокотемпературных установках без контакта с расплавленной средой [14, 15]. Так, для исследования возможности использования таких огнеупоров в печах непрерывного действия для плавки кварцевого стекла при температуре газовой среды около 2000 °С были получены кольцевые изделия (внешний диаметр 320, толщина стенки 30, высота 300–310 мм). Огнеупорные изделия ВЦ-1 и ВЦ-3 (рис. 4) не имели трещин и характеризовались достаточной механической прочностью.

Получение плавнелитых высокоциркониевых огнеупоров вызывает большой интерес у зарубежных исследователей. В ранних разработках [16, 17] показана целесообразность применения плавнелитого высокоциркониевого огнеупора (93,8 % ZrO_2 , 3,1 % SiO_2), содержащего незначительные добавки Al_2O_3 (0,6 %), Na_2O (0,3 %) и B_2O_3 (0,3 %), для варки боросиликатных и цирконийсодержащих стекол, особенно стекла Е. Одновременно подчеркивалась сложность технологии изготовления такого материала, позволяющего получать изделия размерами не более 350×300×200 мм. Такие разработки явились основой для создания фирмой SEPR (Франция) высокоциркониевого огнеупора марки ER 1195 следующего состава, %: ZrO_2 94,2, SiO_2 4,0, Al_2O_3 1,2, Na_2O 0,3, ($TiO_2 + Fe_2O_3$) 0,3. Фазовый состав этого огнеупора, %: моноклинная модификация ZrO_2 94,0, стеклофаза 6,0. По представленным данным промышленных испытаний, коррозионная стойкость огнеупора ER 1195 при 1550 °С в расплаве боросиликатного стекла больше, чем огнеупора ER 1711, в 4 раза, опалового стекла в 2 раза, свинецсодержащего и телевизионного стекла (при лабораторных испытаниях) в 1,4 раза. По такому важному показателю, как выделение пороков в стекло (газовый пузырь и ка-

мень), этот огнеупор значительно превосходит другие огнеупоры. Для обеспечения высокой коррозионной стойкости и качества продукции огнеупор ER 1195 рекомендован для производства стеклокерамики, боросиликатного, опалового фторидного и телевизионного стекла [18]. Примером успешного использования высокоциркониевых огнеупоров за рубежом следует считать материалы ZFC и ZFCR, производимые в Японии, следующего состава, %: ZrO_2 90–94, SiO_2 4,5–7,8, Al_2O_3 0,8–1,2 и Na_2O 0,3 [19]. Эти материалы рекомендовано использовать в производстве алюмосиликатных и боросиликатных стекол, а также для изготовления электродных блоков. Стоимость 1 т высокоциркониевых огнеупоров типов ZFC и ZFCR более 30 тыс. долл. США.

Приведенные результаты исследований позволяют рассматривать высокоциркониевые огнеупоры как материалы с высокой коррозионной стойкостью, наиболее перспективные для варки специальных стекол. Однако при использовании таких огнеупоров необходимо учитывать их эксплуатационные особенности и стоимость. К эксплуатационным особенностям огнеупоров вследствие их высокой плотности необходимо отнести значительное увеличение массы кладки при постоянном объеме. Расчет показывает, что расход огнеупоров, содержащих 85–95 % ZrO_2 , для одного и того же объема кладки увеличивается на 25–30 % по сравнению с расходом огнеупоров Бк-33 и Бк-41.

Важным показателем технологии высокоциркониевых огнеупоров является уровень затрат на их производство. Так, затраты на сырье при производстве 1 т огнеупора ВЦ-147 возрастают более чем в 2,5 раза по сравнению со стоимостью сырья на производство 1 т огнеупора Бк-41. По ориентировочной оценке всех затрат на производство огнеупоров с 85–90 % ZrO_2 (с учетом повышенного расхода электроэнергии при плавке, применения графитовых форм при литье, повышенного брака изделий из-за трещиноватости даже при



Рис. 4. Плавнелитые кольцевые изделия из высокоциркониевых огнеупоров

управляемом отжиге), стоимость таких огнеупоров возрастет более чем в 5 раз по сравнению со стоимостью огнеупора Бк-41. Поэтому определение путей практического использования высокоциркониевых огнеупоров необходимо проводить с учетом технологических трудностей и затрат на получение изделий. Наиболее рациональным следует считать определение в первую очередь тех областей использования высокоциркониевых материалов, в которых эффект от их применения значительно превышает высокую стоимость.

Библиографический список

1. **Соколов, В. А.** Фазовый состав продуктов высокочастотного плавления в системе ZrO_2-SiO_2 / В. А. Соколов, Б. Р. Мушаилова // Труды ГИС. Физико-химические исследования структуры и свойств стекол и стеклокристаллических материалов. — 1982. — С. 13–18.
2. **Sokolov, V. A.** Preparation and properties of fused zircon / V. A. Sokolov, M. D. Gasparyan, E. V. Bogatyreva // Refract. Ind. Ceram. — 2019. — Vol. 60, № 3. — P. 258–260.
3. **Соколов, В. А.** Получение и свойства плавного циркона / В. А. Соколов, М. Д. Гаспарян, Е. В. Богатырева // Новые огнеупоры. — 2019. — № 5. — С. 96–99.
3. **Goton, R.** Corrosion von schmelzgegossenen Zirkon-Korund-Steinen in Glasschmelzwannen in Abhängigkeit von ihrem Oxydationsgrad / R. Goton, A. Krings // Silikattechnik. — 1967. — Bd 18, № 8. — S. 248–251.
4. **Галдина, Н. М.** Исследования систем $ZrO_2-Al_2O_3$, $ZrO_2-Al_2O_3-SiO_2$ в области высокоогнеупорных составов / Н. М. Галдина, В. И. Гутман // Стекло: труды ГИС. № 2. — М.: Стройиздат, 1967. — С. 16–18.
5. **Locsei, B.** Entwicklung neuer hochbeanspruchbarer schmelzgegossener feuerfester Stein / B. Locsei // Keramische Zeitschrift. — 1975. — Bd 27, № 10. — S. 529–533.
6. **Соколов, В. А.** Получение плавнелитых высокоциркониевых материалов / В. А. Соколов // Труды ГИС. Исследования в области огнеупоров для стекловаренных печей. — 1984. — С. 48–55.
7. **Sokolov, V. A.** Aspects of obtaining and using fusion-cast high-zirconia refractories / V. A. Sokolov // Refractories. — 1986. — Vol. 27, № 3/4. — P. 236–240.
8. **Соколов, В. А.** Особенности получения и применения плавнелитых высокоциркониевых огнеупоров / В. А. Соколов // Огнеупоры. — 1986. — № 4. — С. 46–49.
8. **Baxter, D. F.** Help for glass melter / D. F. Baxter // Ceramic Industry. — 1989. — Vol. 132, № 7. — P. 24–26.
9. **Sokolov, V. A.** Arc melting plant for synthesizing and producing fusion-cast refractories / V. A. Sokolov, M. D. Gasparyan, P. P. Mamochkin // Refract. Ind. Ceram. — 2009. — Vol. 50, № 3. — Article № 185.
10. **Соколов, В. А.** Дуговые плавильные установки для синтеза и производства плавнелитых огнеупоров / В. А. Соколов, М. Д. Гаспарян, П. П. Мамочкин // Новые огнеупоры. — 2009. — № 6. — С. 15–18.
10. **Sokolov, V. A.** Structure and properties of fused materials in the high zirconia region of the ZrO_2-SiO_2-CaO system / V. A. Sokolov, M. N. Shatalov, B. R. Mushailova, L. I. Shvorneva // Refractories. — 1989. — Vol. 30, № 9/10. — P. 618–620.
11. **Соколов, В. А.** Структура и свойства плавных материалов высокоциркониевой области системы ZrO_2-SiO_2-CaO / В. А. Соколов, М. Н. Шаталов, Б. Р. Мушаилова, Л. И. Шворнева // Огнеупоры. — 1989. — № 10. — С. 20–22.
11. **Sokolov, V. A.** Corrosion resistance of refractories in melts of glasses used to immobilize radioactive waste / V. A. Sokolov, M. D. Gasparyan, M. B. Remizov, P. V. Kozlov // Refract. Ind. Ceram. — 2016. — Vol. 57, № 2. — P. 160–163.
12. **Соколов, В. А.** Коррозионная стойкость огнеупоров в расплавах стекол при иммобилизации радиоактивных отходов / В. А. Соколов, М. Д. Гаспарян, М. Б. Ремизов, П. В. Козлов // Новые огнеупоры. — 2016. — № 3. — С. 149–151.
12. **Sokolov, V. A.** Selection of refractory materials for electric furnaces used for radioactive waste vitrification / V. A. Sokolov, M. D. Gasparyan, M. B. Remezov [et al.] // Refract. Ind. Ceram. — 2018. — Vol. 59, № 6. — P. 612–615.
13. **Соколов, В. А.** Выбор огнеупорных материалов для электрических печей остекловывания радиоактивных отходов / В. А. Соколов, М. Д. Гаспарян, М. Б. Ремизов [и др.] // Новые огнеупоры. — 2018. — № 11. — С. 53–55.
13. **Рублевский, И. П.** Стеклоустойчивость высокоциркониевого плавного огнеупора / И. П. Рублевский, А. А. Верлоцкий, В. П. Фролова [и др.] // Стекло и керамика. — 1983. — № 11. — С. 8–11.
14. **Keguang, S.** Improved insulation for induction-heated ZrO_2 furnace / S. Keguang, R. A. Pike, A. T. Chapman // Ceram. Bull. — 1986. — Vol. 65, № 12. — P. 1604, 1605.
15. **Karaulov, A. G.** Service of zirconia refractories in continuous furnaces for quartz glass melting / A. G. Karaulov, N. V. Pashchenko, V. I. Lisov, Yu. I. Vasil'ev // Refractories. — 1994. — Vol. 35, № 1/2. — P. 70–73.
16. **Караулов, А. Г.** Служба огнеупоров из диоксида циркония в печах непрерывного действия для плавки кварцевого стекла / А. Г. Караулов, Н. В. Пащенко, В. И. Лисов [и др.] // Огнеупоры. — 1994. — № 2. — С. 25–28.
16. **Davis, A. D.** High zirconia glass refractories / A. D. Davis, T. M. Wenrenberg // Ceramic Engineering and Science Proceeding. — 1988. — Vol. 9, № 3/4. — P. 273–283.
17. **Ito, A.** Fusion-cast zirconia refractories for use with problem glasses / A. Ito, S. Endo, R. W. Brown [et al.] // Am. Ceram. Soc. Bull. — 1980. — Vol. 50, № 7. — P. 746, 747.
18. **Проспект SEPR GROUP «Refractory Products for glass furnaces. Fused cast refractories», 2000. — 64 p.**
19. **Демидова, Ж. Н.** Огнеупорные материалы в стекольной промышленности / Ж. Н. Демидова // Новые огнеупоры. — 2005. — № 10. — С. 88–93. ■

Получено 20.03.22

© В. А. Соколов, М. Д. Гаспарян,
С. С. Кирова, 2022 г.