

Д. т. н. Ю. Е. Пивинский¹, М. А. Скуратов², к. т. н. В. А. Дороганов² (✉),
к. т. н. Е. А. Дороганов²

¹ ООО «НВФ «Керамбет-Огнеупор», Санкт-Петербург, Россия

² ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», Белгород, Россия

УДК 666.762.1+666.792.32]:53.72.4

КЕРАМИЧЕСКИЕ ВЯЖУЩИЕ СУСПЕНЗИИ КОМПОЗИЦИОННОГО СОСТАВА В СИСТЕМЕ $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2\text{--SiC}$ И КЕРАМОБЕТОНЫ НА ИХ ОСНОВЕ

На основе ВКВС высокоглиноземистого шамота и предварительно диспергированного в воде порошка карбида кремния получены вяжущие композиционного состава с содержанием SiC от 10 до 40 %. На основе этих ВКВС и муллитового полидисперсного заполнителя методом вибролитья получены керамобетоны и изучены их свойства. При температуре обжига 1200 °С максимальным пределом прочности при сжатии (150 МПа) обладают образцы, содержащие 15 % SiC. В зависимости от температуры обжига (1200 и 1400 °С) и содержания SiC прирост массы образцов, характеризующий степень окисления SiC, находится в пределах 0,2–2,6 %. Установлена повышенная термостойкость образцов, содержащих в матричной системе 10 % SiC.

Ключевые слова: ВКВС, керамобетоны, карбид кремния, муллит, прирост массы, окисление SiC, термостойкость, прочность при сжатии.

В производстве и применении огнеупорных и керамических материалов самым распространенным из бескислородных соединений является карбид кремния. Благодаря высокой прочности (в том числе при высоких температурах), химической устойчивости и термостойкости огнеупоры на основе SiC или со значительным его содержанием широко используют на практике, особенно в черной и цветной металлургии [1–7]. Карбидкремнийсодержащие материалы широко применяют также в технологиях, основанных на использовании высококонцентрированных керамических вяжущих суспензий (ВКВС) [6–16], являющихся (в отличие от глин, как природных керамических вяжущих) искусственными керамическими вяжущими — ИКВ [17–22].

Как и в предшествующих работах [9, 10, 23], в качестве базового высокоглиноземистого материала использовали шамот преимущественно муллитового состава, полученный дроблением брака изделий марки МЛО-62. Как указано в статье [23], фазовый состав этих изделий включает муллит (62–68 %), корунд (10–20 %) и стеклофазу (15–20 %) при общем содержании Al_2O_3 66–67

% и SiO_2 до 32 %. Для получения базовой ВКВС применяли шамот с размерами частиц менее 1 мм, заполнителем служил полифракционный шамот с размерами частиц от 0,2 до 3,0 мм; последний характеризовался открытой пористостью в пределах 10–12 %. В качестве второго компонента для получения ВКВС сложного состава использовали полидисперсный среднезернистый карбид кремния с размерами частиц 10–100 мкм, характеризующийся медианным диаметром $d_m = 35$ мкм. Способ получения ВКВС композиционного состава заключался в следующем. Первоначально осуществляли мокрое измельчение шамота в керамической мельнице с порционной загрузкой материала [24] и последующей стабилизацией полученной ВКВС посредством механического перемешивания [24, 25]. По аналогии с публикацией [15] карбид кремния в состав ВКВС вводили в предварительно диспергированном состоянии при pH суспензии 9,5 с последующим совместным перемешиванием.

Исходная суспензия муллитового состава характеризовалась плотностью 2,37 г/см³, объемной концентрацией твердой фазы C_v 0,66, влажностью W 14,7 % и pH 9,3. Частицы твердой фазы ВКВС обладали существенной полидисперсностью ($K_n = 12$) при $d_m = 6$ мкм. При этом содержание частиц размерами менее 1 мкм составляло 10 %, а $d_{\max} = 100$ мкм. Диспергированный в воде карбид кремния в состав базовой ВКВС вводили в количестве 10, 20, 30 и 40 мас. %. С учетом близких показателей истинной плотно-



В. А. Дороганов

E-mail: dva_vadjik1975@mail.ru

сти шамота и карбида кремния (3,10 и 3,20 г/см³) объемное содержание частиц SiC в смешанной суспензии было близко к массовому. При этом плотность смешанных суспензий была несколько выше (2,42 г/см³ при 40 % SiC), чем плотность исходной ВКВС.

Для изучения свойств материалов на основе ВКВС как исходной, так и композиционного состава с разным содержанием SiC методом шликерного литья в гипсовых формах формовали образцы размерами 10×10×70 мм. В зависимости от состава они характеризовались исходной пористостью 16–18 %. Образцы керамобетон в виде кубов с ребром 50 мм формовали методом вибролитья в металлических формах. При этом состав масс во всех случаях содержал (по массе твердого) 50 % вяжущей суспензии и 50 % шамота муллитового состава (0,2–3,0 мм). Образцы высушенных керамобетон характеризовались открытой пористостью $P_{отк}$ в пределах 21–23 %, что значительно выше $P_{отк}$ аналогичных керамобетон с заполнителем на основе SiC [10]. Повышенные значения $P_{отк}$ в настоящей работе обусловлены применением шамотных заполнителей, характеризующихся значительной пористостью. После сушки образцы обжигали при разных температурах. При этом изучали пористость, пределы прочности при изгибе и сжатии, термостойкость, прирост массы и изменение линейных размеров (усадка, рост).

Реологические свойства исходной ВКВС показаны на рис. 1. Видно, что в области низких значений градиента скорости сдвига $\dot{\epsilon}$ (от 1 до 9 с⁻¹) отмечается примерно двойное снижение эффективной вязкости $\eta_{эф}$, свидетельствующее о незначительном проявлении тиксотропии. Между тем после достижения минимального значения $\eta_{эф}$ (~ 0,6 Па·с) дальнейшее увеличение $\dot{\epsilon}$ приводит к существенному росту $\eta_{эф}$, что свидетельствует о преимущественно дилатантном характере течения ВКВС. Исходя из этого, данный тип течения ВКВС классифицируется как тиксотропно-дилатантный [25].

На рис. 2 показано влияние pH и $\dot{\epsilon}$ на $\eta_{эф}$ ВКВС композиционного состава (с 30 % SiC). Видно, что при всех значениях $\dot{\epsilon}$ минимальный уровень вязкости соответствует pH в интервале 9,0–9,3. Существенный рост $\eta_{эф}$ при этом отмечается при pH = 9,6. При всех значениях pH наблюдается заметный рост $\eta_{эф}$ по мере увеличения $\dot{\epsilon}$ (от 9 до 81 с⁻¹). Если при pH = 8,2 этот рост незначителен, то при pH = 9,6 $\eta_{эф}$ увеличивается в 3 раза. Таким образом, для ВКВС композиционного состава, по аналогии с исходной ВКВС, отмечается преимущественно дилатантный характер течения, отличающийся повышением вязкости по мере роста градиента скорости сдвига.

На рис. 3 показано влияние содержания SiC в композиционном вяжущем на $P_{отк}$ образцов. Видно, что $P_{отк}$ образцов, содержащих SiC, как

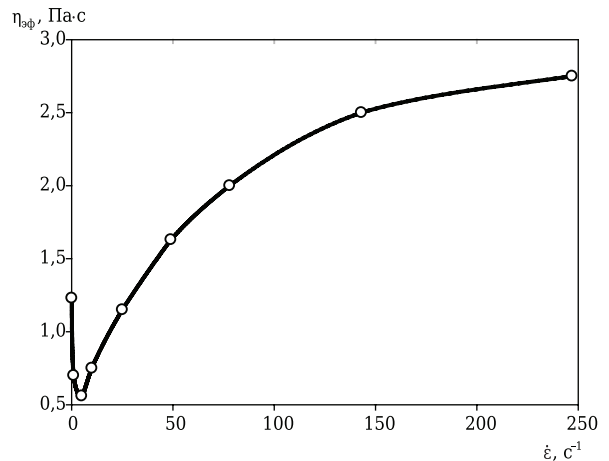


Рис. 1. Зависимость эффективной вязкости $\eta_{эф}$ высокоглиноземистой суспензии с $C_V = 0,66$ от градиента скорости сдвига $\dot{\epsilon}$

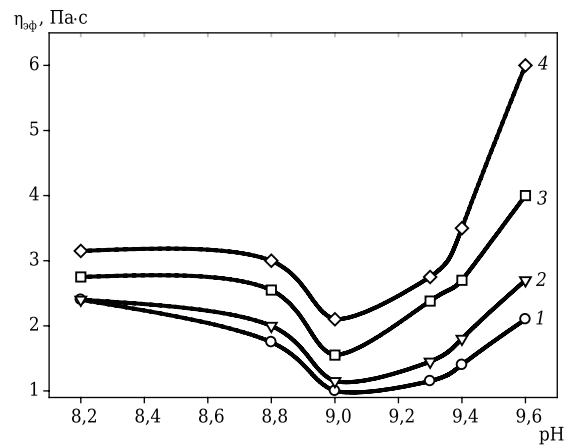


Рис. 2. Зависимость $\eta_{эф}$ ВКВС композиционного состава от pH при разных значениях $\dot{\epsilon}$: 1 — 9 с⁻¹; 2 — 16 с⁻¹; 3 — 48 с⁻¹; 4 — 81 с⁻¹

в исходном (после сушки) состоянии (см. рис. 3, кривая 1), так и после обжига (см. рис. 3, кривые 2, 3) заметно ниже $P_{отк}$ образцов, не содержащих SiC. Это обусловлено тем, что дисперсность частиц SiC существенно выше, чем у базовой суспензии. Так, d_m SiC в 6 раз выше, чем у базовой суспензии. В данном случае частицы SiC являются своеобразным микрозаполнителем, увеличивающим степень полидисперсности и повышающим плотность упаковки при формовании [24, 25]. При этом характерно, что разница в показателях $P_{отк}$ у образцов исходных и после обжига при 1400 °С (см. рис. 3, кривые 1, 3) повышается от 1,8 % (без SiC) до 4,2 % (с 40 % SiC). Это свидетельствует о более существенном спекании образцов на основе ВКВС композиционного состава.

На рис. 4 показано влияние содержания SiC в исходном вяжущем и керамобетоне на предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}$ образцов как после сушки, так и после обжига при 1200 и 1400 °С.

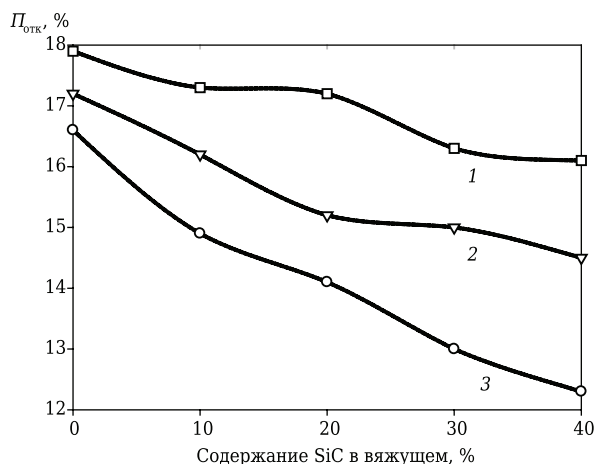


Рис. 3. Влияние содержания SiC в ВКВС композиционного состава на $P_{отж}$ образцов керамобетонов после сушки (1), обжига при 1200 (2) и 1400 °C (3)

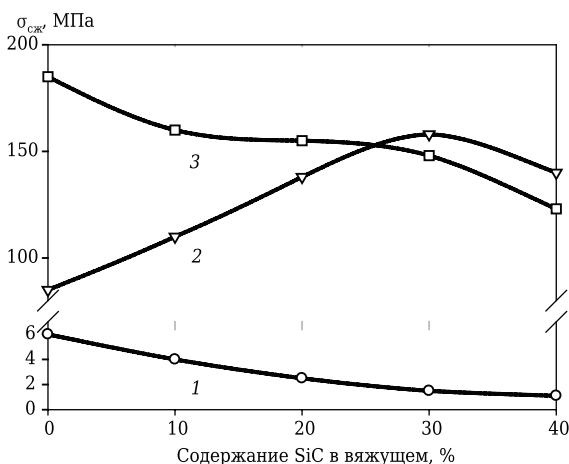


Рис. 4. Влияние содержания SiC в ВКВС композиционного состава на $\sigma_{сж}$ образцов керамобетонов после сушки (1), обжига при 1200 (2) и 1400 °C (3)

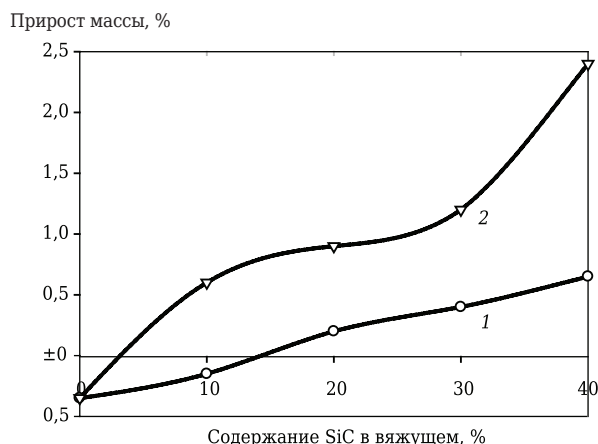


Рис. 5. Влияние содержания SiC в ВКВС композиционного состава на относительные показатели прироста массы образцов керамобетонов после обжига при 1200 (1) и 1400 °C (2)

Видно, что у высушенных образцов (см. рис. 4, кривая 1) значения $\sigma_{сж}$ существенно снижаются по мере повышения содержания SiC в исходном составе (от 6 до 1 МПа); обратная зависимость наблюдается у образцов после обжига при 1200 °C (см. рис. 4, кривая 2). При увеличении содержания SiC до 30 % в матричной системе (до 15 % в составе керамобетона) $\sigma_{сж}$ увеличивается от 85 МПа (исходный состав) до 150 МПа.

При повышении температуры обжига до 1400 °C (см. рис. 4, кривая 1) максимальными значениями $\sigma_{сж}$ (185 МПа) характеризуются исходные образцы без SiC. По мере повышения содержания SiC от 10 до 40 % $\sigma_{сж}$ образцов снижается от 160 до 120 МПа. Столь существенную разницу этой зависимости, охарактеризованной кривыми 2 и 3 (см. рис. 4), предположительно, можно объяснить различием в структуре материалов, обусловленным процессом окисления SiC. Как обнаружено еще в работе [10], в образцах керамобетона, обожженных при 1300–1350 °C, наблюдается дефект структуры, известный под названием «черная сердцевина». Обнаруживается она в центральной части образцов и обусловлена присутствием в материале свободного углерода и кремния вследствие недостаточного окисления при обжиге.

Характер зависимости $\sigma_{сж}$ от содержания SiC в керамобетоне после обжига определяется степенью окисления SiC, сопровождаемого существенным приростом массы образцов [11, 12]. Как следует из рис. 5, независимо от содержания SiC в вяжущем отмечается существенная разница в показателях прироста массы образцов в зависимости от температуры обжига. При максимальном (40 %-ном) содержании SiC прирост массы образцов, обожженных при 1400 °C, в 4 раза выше, чем у аналогичных образцов, обожженных при более низкой (1200 °C) температуре. Из сопоставления кривой 2 (см. рис. 5) и кривой 3 (см. рис. 4) следует, что максимальные показатели прироста массы образцов соответствуют минимальные значения прочности.

Еще в работе [10] была установлена повышенная термостойкость муллитокремниевых керамобетонов с 35 и 40 % полифракционного заполнителя SiC. Потеря прочности образцов в виде кубов с ребром 50 мм, предварительно обожженных при 1350 °C, после пяти циклов (1000 °C – вода) составляла 15–18 %. В настоящей работе на образцах исходного состава и с разным содержанием SiC термостойкость изучали при более жестких условиях испытаний. Как и в работе [10], на образцах керамобетона, обожженных при 1350 °C, термостойкость исследовали по относительным показателям потери прочности после 10 циклов по режиму 1300 °C – вода. На рис. 6 показано влияние содержания SiC в вяжущем на $\sigma_{сж}$ после термоциклирования. Показатели $\sigma_{сж}$ образцов исходных

(без SiC) и с 10 % SiC после обжига были сопоставимы (110–115 МПа). Между тем, как следует из рис. 6, максимальными значениями $\sigma_{сж}$ после испытаний характеризуются образцы на основе вяжущего с 10 %-ным содержанием SiC. Эти показатели только на 15–20 % ниже, чем у исходных образцов (до термоциклирования). Относительное снижение $\sigma_{сж}$ исходных образцов (без SiC) при этом составляет 40–50 %. Обнаружено, что образцы, подвергнутые этим испытаниям, характеризовались увеличением пористости на 0,8–1,0 % (по сравнению с исходными). Это может свидетельствовать о развитии в материале микротрещиноватой структуры, которая благоприятствует повышению его термостойкости. Относительно меньшие показатели $\sigma_{сж}$ образцов с повышенным содержанием SiC связаны с существенным увеличением суммарного окисления SiC, сопровождаемого эффектом роста образцов при обжиге и снижением их прочности [11–13].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе высокоглиноземистого шамота с преимущественно муллитовым составом посредством мокрого измельчения получены ВКВС, характеризующиеся высокой концентрацией и тиксотропно-дилатантным характером течения. Для получения ВКВС композиционного состава в системе Al_2O_3 – SiO_2 –SiC в состав этой ВКВС вводили предварительно диспергированный в воде

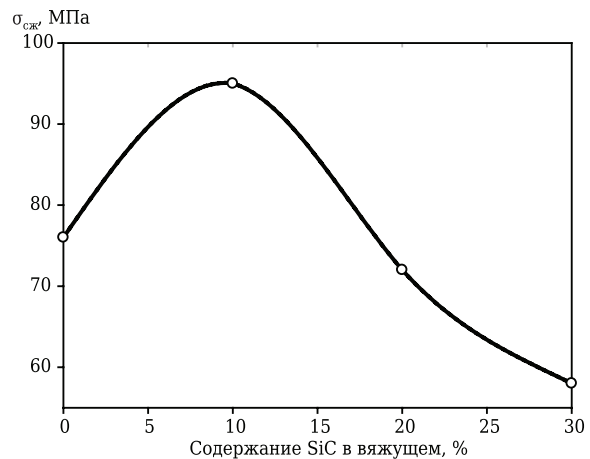


Рис. 6. Влияние содержания SiC в ВКВС композиционного состава на $\sigma_{сж}$ образцов керамобетонов после 10 термоциклов (1300 °C – вода)

SiC полифракционного состава в количестве от 10 до 40 %. ВКВС композиционного состава являлась матричной системой для получения муллитокарбидкремниевых керамобетонов, полученных с муллитовым заполнителем. Изучено влияние температуры обжига (1200 и 1400 °C) на $\sigma_{сж}$ и окисляемость SiC, оцениваемую по приросту массы образцов. Установлено, что термостойкость образцов, содержащих 10 % SiC в матричной системе, существенно превосходит этот показатель исходных (без SiC) керамобетонов.

Библиографический список

1. **Кайнарский, И. С.** Карбундовые огнеупоры / И. С. Кайнарский, Э. В. Дегтярева. — Харьков : Металлургия, 1963. — 252 с.
2. **Пивинский, Ю. Е.** Неформованные огнеупоры. Т. 1. Кн. 1. Общие вопросы технологии / Ю. Е. Пивинский. — М. : Теплоэнергетик, 2003. — 448 с.
3. **Oliveira, J. R.** Defloculation of Al_2O_3 –SiC suspension / J. R. Oliveira, V. C. Pandolfelli // Am. Ceram. Soc. Bull. — 2001. — Vol. 80, № 2. — P. 47–53.
4. **Гнесин, Г. Г.** Карбидокремниевые материалы / Г. Г. Гнесин. — М. : Металлургия, 1977. — 215 с.
5. Огнеупорные материалы. Структура, свойства, испытания : справочник / Й. Алленштейн [и др.] ; под ред. Г. Роучка, Х. Вутнау ; пер. с нем. — М. : Интермет Инжиниринг, 2010. — 392 с.
6. **Grishpun, E. M.** Production and service of high-alumina ceramic castables. 1. Ramming mixtures based on modified bauxite HCBs / E. M. Grishpun, Yu. E. Pivinskii, E. V. Rozhkov [et al.] // Refract. Ind. Ceram. — 2000. — Vol. 41, № 3/4. — P. 104–108.
7. **Гришпун, Е. М.** Производство и служба высокоглиноземистых керамобетонов. 1. Набивные массы на основе модифицированных ВКВС боксита / Е. М. Гришпун, Ю. Е. Пивинский, Е. В. Рожков [и др.] // Огнеупоры и техническая керамика. — 2000. — № 3. — С. 37–41.
8. **Rozhkov, E. V.** Production and service of high-alumina ceramic castables. 2. Properties and service of vibration-placed castables based on bauxite-modified highly concentrated ceramic binding suspensions (HCBs)

for use in blast-furnace runners / E. V. Rozhkov, Yu. E. Pivinskii, M. Z. Naginskii // Refract. Ind. Ceram. — 2001. — Vol. 42, № 5/6. — P. 209–215.

Рожков, Е. В. Производство и служба высокоглиноземистых керамобетонов. 2. Свойства и служба виброналивных желобных масс на основе модифицированных ВКВС боксита / Е. В. Рожков, Ю. Е. Пивинский, М. З. Нагинский // Огнеупоры и техническая керамика. — 2001. — № 5. — С. 37–44.

8. **Pivinskii, Yu. E.** Engineering, manufacturing and servicing of shaped and unshaped refractories based on highly concentrated ceramic binding suspensions / Yu. E. Pivinskii, E. M. Grishpun, A. M. Gorokhovskii // Refract. Ind. Ceram. — 2015. — Vol. 56, № 3. — P. 245–253.

Пивинский, Ю. Е. Разработка технологий, производство и служба формованных и неформованных огнеупоров на основе ВКВС / Ю. Е. Пивинский, Е. М. Гришпун, А. М. Гороховский // Новые огнеупоры. — 2015. — № 5. — С. 29–39.

9. **Pivinskii, Yu. E.** Cast (self-flow) ceramic castables. 3. Rheotechnological properties of molding systems for fabrication of silicon carbide ceramic castables / Yu. E. Pivinskii, M. A. Skuratov // Refract. Ind. Ceram. — 2000. — Vol. 41, № 11/12. — P. 401–404.

Пивинский, Ю. Е. Литые (саморастекающиеся) керамобетоны. 3. Реотехнологические свойства формованных систем для получения карбидкремниевых керамобетонов / Ю. Е. Пивинский, М. А. Скуратов // Огнеупоры и техническая керамика. — 2000. — № 11. — С. 32–36.

10. **Skuratov, M. A.** Cast (self-flow) ceramic castables. 4. Spreadability of molding systems and some properties of mullite-silicon carbide ceramic castables / *M. A. Skuratov, Yu. E. Pivinskii* // *Refract. Ind. Ceram.* — 2001. — Vol. 42, № 1/2. — P. 23–29.

Скуратов, М. А. Литые (саморастекающиеся) керамобетоны. 4. Растекаемость формовочных систем и некоторые свойства муллитокарбидкремниевых керамобетонов / *М. А. Скуратов, Ю. Е. Пивинский* // *Огнеупоры и техническая керамика.* — 2001. — № 1. — С. 25–31.

11. **Pivinskii, Yu. E.** Research in the field of composite materials based on HCBS and refractory materials based on the system $Al_2O_3-SiO_2-SiC$. Part 1 / *Yu. E. Pivinskii, P. V. Dyakin* // *Refract. Ind. Ceram.* — 2018. — Vol. 59, № 2. — P. 124–133.

Пивинский, Ю. Е. Исследования в области композиционных ВКВС и огнеупорных материалов на их основе в системе $Al_2O_3-SiO_2-SiC$. Часть 1 / *Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин* // *Новые огнеупоры.* — 2018. — № 3. — С. 17–27.

12. **Pivinskii, Yu. E.** Research in the field of composite materials based on HCBS and refractory materials based on the system $Al_2O_3-SiO_2-SiC$. Part 2 / *Yu. E. Pivinskii, P. V. Dyakin* // *Refract. Ind. Ceram.* — 2018. — Vol. 59, № 3. — P. 247–251.

Пивинский, Ю. Е. Исследования в области композиционных ВКВС и огнеупорных материалов на их основе в системе $Al_2O_3-SiO_2-SiC$. Часть 2 / *Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин* // *Новые огнеупоры.* — 2018. — № 5. — С. 22–27.

13. **Dyakin, P. V.** Research in the field of composite materials based on HCBS and refractory materials based on the system $Al_2O_3-SiO_2-SiC$. Part 3 / *P. V. Dyakin, Yu. E. Pivinskii, A. Yu. Kolobov* // *Refract. Ind. Ceram.* — 2019. — Vol. 59, № 5. — P. 445–453.

Дякин, П. В. Исследования в области композиционных ВКВС и огнеупорных материалов на их основе в системе $Al_2O_3-SiO_2-SiC$. Часть 3 / *П. В. Дякин, Ю. Е. Пивинский, А. Ю. Колобов* // *Новые огнеупоры.* — 2018. — № 9. — С. 14–22.

14. **Pivinskii, Yu. E.** Research in the field of composite materials based on HCBS and refractory materials based on the system $Al_2O_3-SiO_2-SiC$. Part 4 / *Yu. E. Pivinskii, P. V. Dyakin* // *Refract. Ind. Ceram.* — 2019. — Vol. 60, № 2. — P. 142–148.

Пивинский, Ю. Е. Исследования в области композиционных ВКВС и огнеупорных материалов на их основе в системе $Al_2O_3-SiO_2-SiC$. Часть 4 / *Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин* // *Новые огнеупоры.* — 2019. — № 3. — С. 21–27.

15. **Pivinskii, Yu. E.** Research in the field of preparing molded and unmolded refractories based on high-alumina HCBS. Part 14. Composition and some properties of composite composition ceramic concretes in the system $Al_2O_3-SiO_2-SiC-C$ / *Yu. E. Pivinskii, P. V. Dyakin, L. V. Ostryakov* // *Refract. Ind. Ceram.* — 2018. — Vol. 59, № 2. — P. 124–133.

Пивинский, Ю. Е. Исследования в области получения формованных и неформованных огнеупоров на основе высокоглиноземистых ВКВС. Часть 14. Состав и некоторые свойства керамобетонов композиционного состава в системе $Al_2O_3-SiO_2-SiC-C$ / *Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин, Л. В. Острыков* // *Новые огнеупоры.* — 2018. — № 2. — С. 24–31.

16. **Дякин, П. В.** Фазовый состав, структура и некоторые свойства материалов на основе ВКВС боксита композиционного состава в системе $Al_2O_3-SiO_2-SiC$ / *П. В. Дякин, Ю. Е. Пивинский, Д. С. Прохоренков* [и др.] // *Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова.* — 2020. — № 2. — С. 115–125.

17. **Doroganov, V. A.** Highly concentrated ceramic binder suspensions based on silicon carbide / *V. A. Doroganov,*

Yu. N. Trepalina // *Refract. Ind. Ceram.* — 2010. — Vol. 51, № 4. — P. 302–304.

Дороганов, В. А. Высококонцентрированные керамические вяжущие суспензии на основе карбида кремния / *В. А. Дороганов, Ю. Н. Трепалина* // *Новые огнеупоры.* — 2010. — № 8. — С. 50–52.

18. **Дороганов, В. А.** Огнеупорные материалы на основе искусственных керамических вяжущих суспензий карбидокремниевых состава / *В. А. Дороганов, Е. А. Дороганов, Е. И. Евтушенко* [и др.] // *Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова.* — 2013. — № 4. — С. 156–160.

19. **Doroganov, V. A.** Study of nano-differentiated silicon carbide binders and composites based on them / *V. A. Doroganov, N. A. Peretokina, E. A. Doroganov* [et al.] // *Refract. Ind. Ceram.* — 2015. — Vol. 55, № 5. — P. 465–468.

Дороганов, В. А. Исследование наномодифицированных вяжущих карбида кремния и композитов на их основе / *В. А. Дороганов, Н. А. Перетокина, Е. А. Дороганов* [и др.] // *Новые огнеупоры.* — 2014. — № 9. — С. 44–47.

20. **Zaitsev, S. V.** Study of artificial ceramic binder properties in the system $Al_2O_3-SiO_2-SiC$ / *S. V. Zaitsev, V. A. Doroganov, E. A. Doroganov* [et al.] // *Refract. Ind. Ceram.* — 2017. — Vol. 57, № 5. — P. 526–530.

Зайцев, С. В. Исследование свойств искусственных керамических вяжущих в системе $Al_2O_3-SiO_2-SiC$ / *С. В. Зайцев, В. А. Дороганов, Е. А. Дороганов* [и др.] // *Новые огнеупоры.* — 2016. — № 10. — С. 32–36.

21. **Zaitsev, S. V.** Study of artificial ceramic binders of mullite-silicon carbide composition and composites based on them / *S. V. Zaitsev, V. A. Doroganov, E. A. Doroganov* [et al.] // *Refract. Ind. Ceram.* — 2017. — Vol. 58, № 1. — P. 109–112.

Зайцев, С. В. Исследование искусственных керамических вяжущих муллитокарбидокремниевых состава и композитов на их основе / *С. В. Зайцев, В. А. Дороганов, Е. А. Дороганов* [и др.] // *Новые огнеупоры.* — 2017. — № 2. — С. 46–49.

22. **Zaitsev, S. V.** Artificial ceramic binders based on silicon and silicon carbide for silicon-carbide refractories in a nitride matrix / *S. V. Zaitsev, E. A. Doroganov, V. A. Doroganov* [et al.] // *Refract. Ind. Ceram.* — 2020. — Vol. 60, № 5. — P. 439–444.

Зайцев, С. В. Искусственные керамические вяжущие на основе кремния и карбида кремния для карбидокремниевых огнеупоров на нитридной связке / *С. В. Зайцев, Е. А. Дороганов, В. А. Дороганов* [и др.] // *Новые огнеупоры.* — 2019. — № 9. — С. 25–30.

23. **Pivinskii, Yu. E.** Rheological and binding properties of high-alumina suspensions / *Yu. E. Pivinskii, P. L. Mityakin* // *Refractories.* — 1981. — Vol. 22, № 5/6. — P. 292–298.

Пивинский, Ю. Е. Реологические и вяжущие свойства высокоглиноземистых суспензий / *Ю. Е. Пивинский, П. Л. Митякин* // *Огнеупоры.* — 1981. — № 5. — С. 48–52.

24. **Пивинский, Ю. Е.** Керамические вяжущие и керамобетоны / *Ю. Е. Пивинский.* — М. : *Металлургия,* 1990. — 270 с.

25. **Пивинский, Ю. Е.** Реология дисперсных систем, ВКВС и керамобетоны. Элементы нанотехнологии в силикатном материаловедении. Т. 3 / *Ю. Е. Пивинский.* — СПб. : *Политехника,* 2012. — 682 с. ■

Получено 17.04.20

© Ю. Е. Пивинский, М. А. Скуратов, В. А. Дороганов, Е. А. Дороганов, 2020 г.