

Д. т. н. Ю. Е. Пивинский<sup>1</sup> (✉), П. В. Дякин<sup>2</sup>, Л. В. Остряков<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ООО НВФ «Керамбет-Огнеупор», Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> ОАО «Динур», г. Первоуральск Свердловской обл., Россия

УДК 666.762.11.046.4

## ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ФОРМОВАННЫХ И НЕФОРМОВАННЫХ ОГНЕУПОРОВ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОГЛИНОЗЕМИСТЫХ ВКВС. Часть 5. Влияние температуры обжига на свойства материалов, полученных из композиционных ВКВС с добавкой огнеупорной глины\*

Изучено влияние температуры обжига в интервале 800–1600 °С и длительной термообработки (60 ч при 1350–1400 °С) на показатели усадки и роста, пористости и прочности образцов на основе ВДКС композиционного состава (боксит + ВДКС), а также с добавкой огнеупорной глины. В зависимости от состава образцы характеризуются низкой усадкой в пределах 0,4–1,15 % в области температур 1100–1200 °С и значительным (2,0–2,7 %) ростом вследствие протекающего при 1300–1500 °С процесса вторичного муллитобразования.

**Ключевые слова:** боксит, корунд, огнеупорная глина, высокодисперсное кварцевое стекло (ВДКС), ВКВС, муллитобразование, усадка, спекание, прочность при изгибе.

В предыдущей статье настоящей серии [1] приведены результаты изучения влияния добавки огнеупорной глины на свойства ВКВС композиционного состава и отливок, полученных на их основе. На высокотемпературном dilatометре изучено влияние неизотермического нагрева до 1500 °С на показатели усадки при спекании и роста в процессе вторичного муллитобразования образцов с добавкой огнеупорной глины.

Далее была поставлена задача на основе образцов, полученных из исходной ВКВС композиционного состава, а также с добавкой огнеупорной глины (1–10 %), изучить влияние температуры изотермического обжига с выдержкой 1 ч на показатели линейной усадки, предела прочности при изгибе, установить влияние пористости и усадки на прочность ( $\sigma_{изг}$ ) образцов. С целью прогнозирования свойств материала в процессе длительной службы проведены исследования влияния длительного (около 60 ч при 1350–1400 °С) обжига в динамической печи ОАО «Динур». Характеристика

исходных материалов, а также свойства ВКВС различных составов приведены в статьях [2–4]. В настоящей работе изучены как исходные образцы, так и содержащие 1,0, 2,5, 5,0 и 10 % огнеупорной глины.

На рис. 1 показана зависимость линейной усадки от температуры обжига образцов всех изученных составов. По характеру зависимости линейной усадки от температуры обжига выделены два интервала (I и II).

Первый температурный интервал соответствует области 800–1100 °С, второй — 1100–1250 °С. Отличительная особенность обжига состоит в том, что в области температур первого интервала преимущественно реализуется процесс классического спекания, сопровождаемый уплотнением материала и соответствующей усадкой [2, 3], во втором интервале наряду со спеканием протекает образование вторичного муллита. В отличие от спекания этот процесс сопровождается определенным ростом объема материала. По мере повышения температуры обжига рост объема нивелирует «уплотнительный» механизм спекания.

Из рис. 1 следует, что максимальные значения линейной усадки  $Y_L$  образцов всех видов соответствуют температуре обжига 1100 °С. При ее повышении до 1200 °С эти показатели изменяются незначительно, т. е. несмотря на существенный рост температуры реальное спекание (если его оценивать по величине усадки) материалов прекращается. Для образцов исходных и

\* Часть 1–4 статьи опубликованы в № 8, 10 и 12 за 2015 г. и № 2 за 2016 г.



Ю. Е. Пивинский  
E-mail: pivinskiy@mail.ru

с небольшими добавками глины (1,0, 2,5 %) при повышении температуры с 1150 до 1200 °С  $Y_L$  заметно падает. В области температур 1200–1250 °С для образцов всех составов вследствие увеличения интенсивности муллитообразования отмечается существенное уменьшение показателей  $Y_L$ . При повышении температуры обжига до 1300 °С для всех образцов отмечается определенный рост, который существенно увеличивается после обжига при 1400 °С. Так, показатели роста исходных образцов и с добавкой 5,0 и 10 % глины составляют 2,0 и 2,2 % соответственно, что сопровождается заметным увеличением их пористости. Повышение температуры обжига до 1500 °С для исходных образцов и с 5,0 % глины не сопровождается дополнительным ростом, а рост образцов, содержащих 10 % глины, увеличивается до 2,78 %.

На рис. 2 показана зависимость показателей свойств образцов от содержания добавки огнеупорной глины после их обжига при 1100 °С (1 ч). Как следует из рис. 1, температура 1100 °С является граничной между интервалами спекания и начальной стадии муллитизации. Из рис. 2 следует, что образцы с содержанием глины 1,0 и 2,5 % характеризуются незначительным увеличением  $Y_L$  по сравнению с исходными (без добавки). Однако при увеличении добавки до 5,0 и 10 % усадка резко возрастает примерно в 2 и 3 раза соответственно по сравнению с исходной.

Столь же существенное влияние добавка глины оказывает на  $P_{отк}$  и  $\rho_{каж}$ . При введении 1,0 и 2,5 % глины  $P_{отк}$  увеличивается на 1,5 и 4 % соответственно, т. е. относительно малые добавки глины приводят к резкому понижению плотности упаковки твердой фазы материала. При содержании глины 10 % разница показателей достигает 5,5 %, т. е. относительная пористость по сравнению с исходной увеличивается на 35 %. Соответствующие показатели  $\rho_{каж}$  по мере увеличения содержания глины уменьшаются от 2,85 до 2,62 г/см<sup>3</sup>. Предел прочности при изгибе  $\sigma_{изг}$  образцов резко падает в области добавок до 2,5 % глины, при увеличении добавки до 10 %  $\sigma_{изг}$  уменьшается менее значительно.

Из данных, показанных на рис. 3, следует, что основным фактором, определяющим показатели  $\sigma_{изг}$ , является пористость материала.

На рис. 4 приведены данные, характеризующие влияние содержания глины на показатели открытой пористости и кажущейся плотности после обжига при 1600 °С с выдержкой 2 ч.

Кажущаяся пористость образцов даже при добавках глины 1,0 и 2,5 % резко возрастает и изменяется в пределах 3–15 %. Аналогичные значения  $\rho_{каж}$  изменяются также в значительных пределах — от 2,93 до 2,62 г/см<sup>3</sup>. Характерной особенностью образцов, обожженных при 1600 °С, является наличие в их структуре значительного объема закрытых пор (в отличие от данных

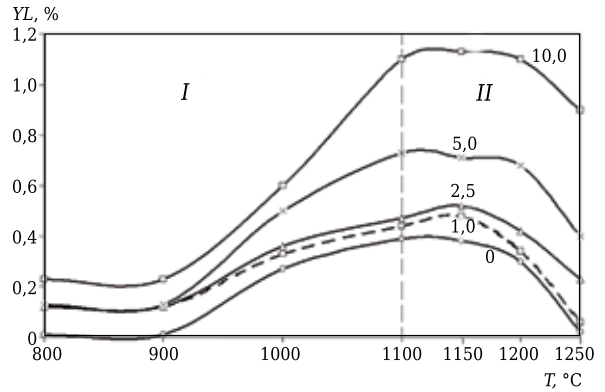


Рис. 1. Влияние температуры  $T$  обжига (выдержка 1 ч) на показатели линейной усадки  $Y_L$  образцов на основе ВКВС с добавкой глины (количество, %, указано на кривых): I — интервал температур преимущественного спекания; II — интервал температур спекания и муллитизации

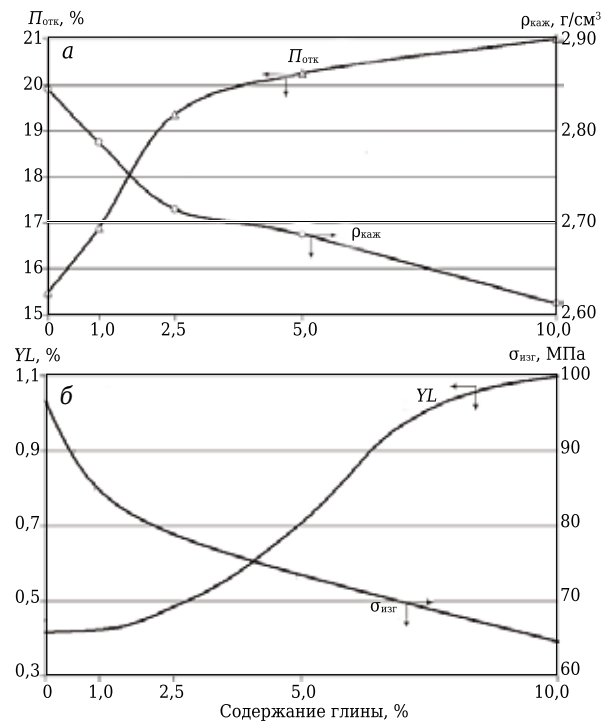


Рис. 2. Влияние содержания глины на показатели открытой пористости  $P_{отк}$  и кажущейся плотности  $\rho_{каж}$  (а), усадки  $Y_L$  и предела прочности при изгибе  $\sigma_{изг}$  (б) после обжига образцов при 1100 °С (1 ч)

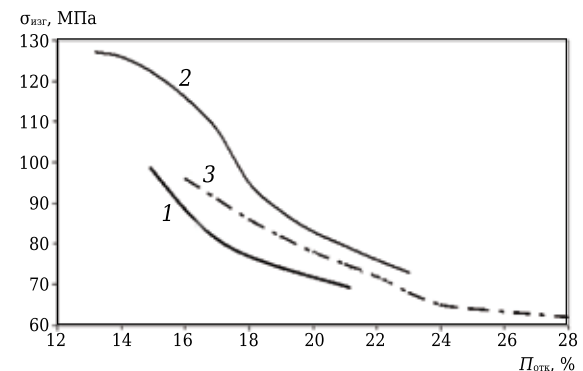


Рис. 3. Влияние  $P_{отк}$  на  $\sigma_{изг}$  образцов, обожженных при 1100 (1) и 1250 (2) °С, а также после обжига в туннельной печи в течение около 60 ч в интервале температур 1350–1400 °С (3)

рис. 2 после обжига при 1100 °С, где закрытая пористость практически отсутствует). Исходя из данных рис. 4 и ориентировочных показателей истинной плотности исходного материала и с 10 % глины после обжига при 1600 °С на уровне 3,40 и 3,30 г/см<sup>3</sup>, можно предположить, что истинная пористость для них составляет 14 и 21 %.

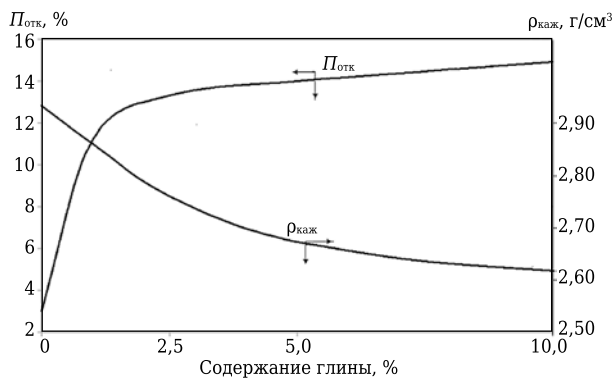


Рис. 4. Влияние содержания глины на  $P_{отк}$  и  $\rho_{каж}$  образцов после обжига при 1600 °С с выдержкой 2 ч

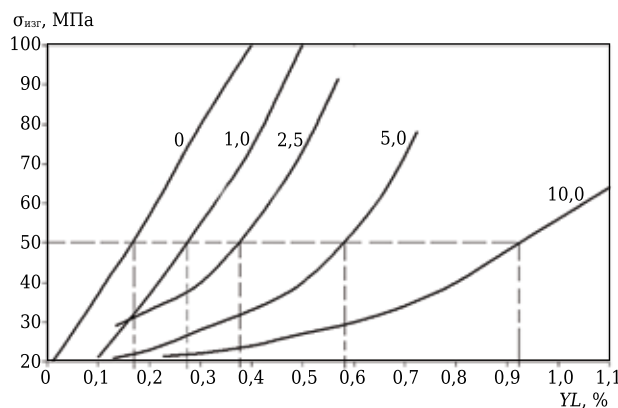


Рис. 5. Влияние линейной усадки  $YL$  в процессе обжига в интервале 900–1250 °С на  $\sigma_{изг}$  образцов на основе ВКВС без добавки и с добавкой глины (количество, %, указано на кривых)

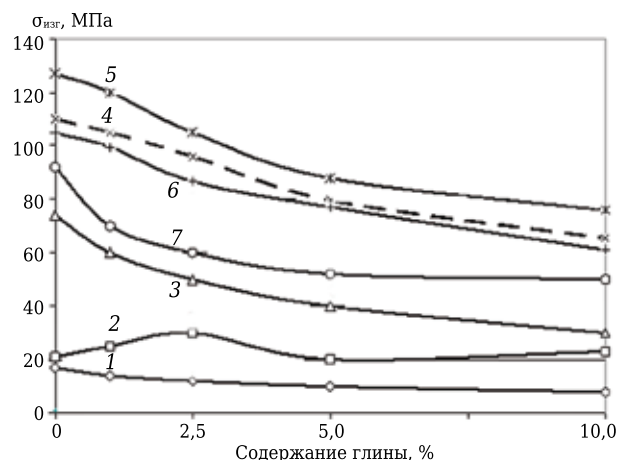


Рис. 6. Влияние содержания глины на  $\sigma_{изг}$  образцов после термообработки при 800 °С в течение 2 ч (1) и после обжига (1 ч) при температуре, °С: 2 — 900; 3 — 1000; 4 — 1200; 5 — 1250; 6 — 1400; 7 — 1600 (2 ч)

Закрытая пористость при этом предположении составит для этих материалов 11 и 7 % соответственно. Из этого следует, что для исходных образцов доля закрытых пор составит около 80 %, для образцов с 10 % глины — только 33 %.

В статьях [5–8], посвященных спеканию кварцевой керамики, была показана практическая важность характера зависимости прочности от величины усадки. Не менее важна аналогичная зависимость применительно к технологии высокоглиноземистых огнеупоров на основе ВКВС [9–11]. На рис. 5 показана зависимость  $\sigma_{изг}$  образцов всех изученных составов от их линейной усадки  $YL$  при обжиге в интервале 900–1250 °С. Отмечается исключительно большая разница показателей  $\sigma_{изг}$  при равных значениях  $YL$  для образцов различных типов. Так, уровень усадки, требуемый для достижения  $\sigma_{изг} = 50$  МПа, для составов, содержащих 5 и 10 % глины, примерно в 4 и 6 раз превышает это значение для исходных образцов (см. рис. 5, пунктирные линии). Как и в предыдущем случае (см. рис. 2) определяющим фактором в данной зависимости является пористость исходного и обожженного полуфабриката.

На рис. 6 представлена зависимость  $\sigma_{изг}$  образцов всех составов при различных температурах обжига с изотермической выдержкой 1 ч. В области термообработки образцов при 800 °С (кривая 1) значение  $\sigma_{изг}$  образцов с содержанием глины 5,0 и 10 % примерно в 1,5 и 2 раза ниже, чем для исходных. С повышением температуры до 900 °С (кривая 2) значения  $\sigma_{изг}$  практически всех материалов находятся в относительно узком интервале (20–30 МПа). Обусловлено это тем, что в отличие от исходных образцов при этой температуре обжига у образцов с добавкой глины отмечается заметная начальная стадия спекания, которая сопровождается заметным ростом прочности. Как следует из сопоставления кривых 1 и 2 при повышении температуры с 800 до 900 °С значения  $\sigma_{изг}$  для образцов с 5 и 10 % глины возрастают в 2 и 3 раза, а для исходных — только в 1,3 раза.

Повышение температуры обжига до 1000 °С (см. рис. 6, кривая 3) приводит к резкому росту прочности исходных образцов и менее значительному — образцов с добавлением глины. Резкий рост прочности образцов всех составов отмечается при повышении температуры обжига до 1200 и 1250 °С (кривые 4 и 5). Достигнутый при этом уровень  $\sigma_{изг}$  110–130 МПа для исходных и 65–75 МПа для образцов с содержанием 10 % глины следует считать весьма высоким ввиду того, что показатель относительной степени их спекания, или доли спеченных пор [7, 8], 0,09–0,14. Показатели  $\sigma_{изг}$  образцов, обожженных при 1250 °С (см. рис. 3, кривая 2), при сопоставимых показателях  $P_{отк}$  характеризуются существенно большей прочностью, чем после

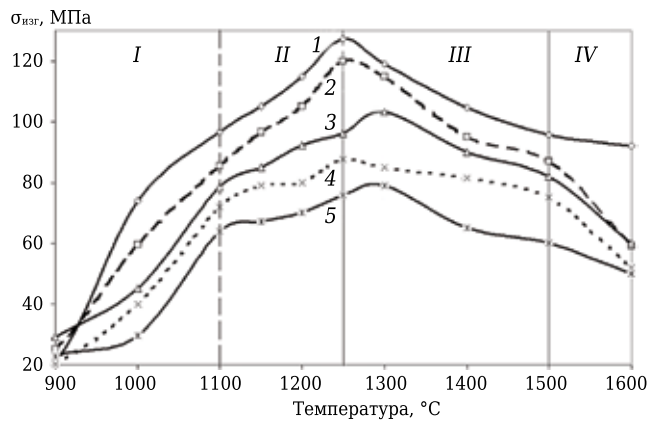
обжига при 1100 °С (см. рис. 3, кривая 1). Повышение температуры обжига до 1400 °С сопровождается интенсивным муллитобразованием, линейным ростом образцов до 2,0–2,3 % [3, 4] и значительным ростом пористости. В связи с этим показатели  $\sigma_{изг}$  образцов всех составов (см. рис. 6, кривая 6) оказываются ниже, чем после обжига при 1200 и 1250 °С. Характерен тот факт, что  $\sigma_{изг}$  образцов после обжига при 1600 °С (см. рис. 6, кривая 7) значительно меньше  $\sigma_{изг}$  образцов, обожженных при более низких температурах (см. рис. 6, кривые 4–6). Одной из возможных причин этого эффекта может быть процесс рекристаллизации структуры материала [12].

Влияние температуры обжига с изотермической выдержкой 1 ч при 1500 °С и 2 ч при 1600 °С на  $\sigma_{изг}$  образцов всех составов показано на рис. 7.

С учетом специфики влияния температуры обжига на кинетику спекания и процесс образования вторичного муллита выделены четыре характерных интервала температур. В интервале I реализуется процесс спекания, в интервале II наряду со спеканием отмечается заметная муллитизация, которая вследствие роста образца частично нивелирует его усадочные явления [2, 3]. Третий температурный интервал (1250–1500 °С) характеризуется преимущественным муллитобразованием, увеличением показателя роста R до 1,8 % для исходных и 2,67 % для образцов с содержанием 10 % глины и соответствующим понижением кажущейся плотности и ростом пористости. При максимальной температуре обжига 1600 °С в различной степени отмечается процесс спекания замуллитизированного материала с определенным ростом плотности и понижением прочности (интервал IV).

Из рис. 7 следует, что в температурном интервале I при повышении температуры с 900 до 1100 °С происходит резкий рост  $\sigma_{изг}$  — от 20–28 до 60–96 МПа. В температурном интервале II (1100–1250 °С) несмотря на начальную стадию муллитизации достигаются максимальные значения  $\sigma_{изг}$  — от 70 до 130 МПа. Однако при этом отмечается менее интенсивный рост прочности по сравнению с происходящим в интервале I. Как следует из рис. 3, кривая 2, для образцов после обжига при 1250 °С при сопоставимых значениях  $P_{отк}$  достигаются заметно большие значения  $\sigma_{изг}$  не только по сравнению с показателями после обжига при 1100 °С (кривая 1), но и по сравнению с  $\sigma_{изг}$  после длительного обжига в туннельной печи (см. рис. 3, кривая 3). В интервале температур преимущественной муллитизации (III) для образцов всех составов отмечается заметное падение прочности, вызванное увеличением пористости и ростом образцов вследствие значительного образования муллита [2–4].

При температуре обжига 1600 °С (интервал температур IV) для образцов всех составов ха-



**Рис. 7.** Влияние температуры обжига на  $\sigma_{изг}$  образцов на основе ВКВС: 1 — исходной; 2 — с добавкой 1 % глины; 3 — 2,5 %; 4 — 5 %; 5 — 10 %; I–IV — интервалы температур, соответствующие преимущественному спеканию (I), спеканию и начальной стадии муллитизации (II), преимущественной муллитизации (III), спеканию преимущественно замуллитизированного материала (IV)

рактерно протекание процесса спекания. Например, для образцов из исходной ВКВС за счет усадки компенсируется не только предшествующий рост (около 2 %), но и остается незначительная усадка (0,5 %), наблюдается уменьшение размеров исходного образца.

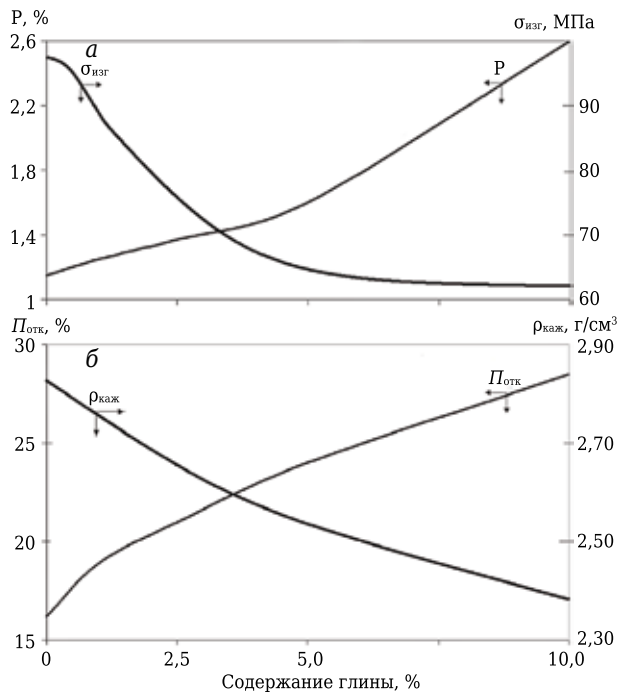
Характер влияния продолжительного обжига образцов в печи для обжига динаса (около 60 ч их пребывания в области 1350–1400 °С) показан на рис. 8. Прежде всего обращают на себя внимание показатели роста R образцов. Если при 1400 °С (1 ч) показатели R для всех образцов были сопоставимыми (2,0–2,27 %), то в данном случае значение R исходных образцов почти в 2,5 раза ниже, чем у образцов с содержанием 10 % глины (1,1 и 2,5 % соответственно). Между тем для образцов с добавками 1,0 и 2,5 % глины значение R не превышает 1,4 %. Такая существенная разница обусловлена тем, что для исходных образцов и с добавками до 2,5 % глины в процессе длительного обжига после окончания муллитобразования отмечается заметное спекание, сопровождаемое усадкой, которая значительно уменьшает измеряемый уровень их роста. Для образцов с добавкой глины 5 и 10 % высокий показатель R объясним не только повышенным содержанием образованного в структуре материала вторичного муллита вследствие большего содержания SiO<sub>2</sub>, но и пониженной степенью их спекания. Вследствие этого показатели кажущейся пористости образцов с добавкой глины 5 и 10 % несколько превышают аналогичные значения исходных термообработанных [1].

Кажущаяся пористость и плотность (см. рис. 8) в значительной мере определяются соответствующим ростом образцов после длительной термообработки, от которой зависит не только



их муллитизация, но и определенная степень последующего спекания. Значения  $P_{отк}$  (см. рис. 8) увеличиваются от 16 % для исходных образцов до 28 % для образцов с добавкой 10 % глины. Соответствующие значения  $\rho_{каж}$  составляют 2,85 и 2,38 г/см<sup>3</sup>. Если предположить, что закрытой пористости в образцах нет, то, исходя из приведенных данных о  $P_{отк}$  и  $\rho_{каж}$ , показатели истинной плотности образцов отмеченных составов составляют 3,30 и 3,39 г/см<sup>3</sup> соответственно. Весьма заметная разница указанных ориентировочных показателей истинной плотности в данном случае вполне оправдана. Обусловлено это тем, что содержание муллита, характеризующегося значительно меньшей плотностью по сравнению с корундом (3,15 и 3,98 г/см<sup>3</sup>), в образцах, содержащих 10 % глины, существенно выше, чем в исходных. Исходя из данных, которые будут приведены в очередной статье, объемное содержание муллита после завершения процесса вторичного муллитообразования составляет примерно 60 и 70 % в образцах без добавки и с добавкой 10 % глины соответственно. Как следует из рис. 8, а показатели  $\sigma_{изг}$  понижаются от 97 МПа для исходных образцов до 62 МПа для образцов, содержащих 10 % глины. При сопоставимых значениях пористости значения  $\sigma_{изг}$  образцов после продолжительной высокотемпературной обработки (см. рис. 3, кривая 3) занимают промежуточное положение между кривыми 1 (обжиг при 1100 °C) и 2 (при 1250 °C).

Таким образом, изучено влияние температуры изотермического обжига в интервале 800–1600 °C и длительной (около 60 ч) термообработки в интервале 1350–1400 °C на показатели усадки и роста, пористости, плотности и предела прочности при изгибе образцов на основе ВКВС композиционного состава (боксит + ВДКС), а также с добавкой огнеупорной глины. С



**Рис. 8.** Влияние содержания глины на  $\sigma_{изг}$  и  $P$  (а),  $P_{отк}$  и  $\rho_{каж}$  (б) образцов после обжига в туннельной печи в течение около 60 ч в интервале 1350–1400 °C

учетом специфики влияния температуры обжига на процессы спекания и образования вторичного муллита выделены 4 характерных температурных интервала. В первом из них (до 1100 °C) реализуется процесс спекания (уплотнения и усадки), во втором (1100–1250 °C) — наряду со спеканием характерна заметная муллитизация, в третьем (1250–1500 °C) — преобладает преимущественное муллитообразование, в четвертом (выше 1500 °C) преобладает спекание замуллитизированного материала.

(Продолжение следует)

### Библиографический список

1. **Пивинский, Ю. Е.** Исследования в области получения формованных и неформованных огнеупоров на основе высокоглиноземистых ВКВС. Часть 4. Влияние добавок огнеупорной глины на свойства ВКВС композиционного состава, отливок и материалов на их основе / Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин // Новые огнеупоры. — 2016. — № 2. — С. 25–33.
2. **Пивинский, Ю. Е.** Исследования в области получения формованных и неформованных огнеупоров на основе высокоглиноземистых ВКВС. Часть 1. Высокоглиноземистый боксит как базовый сырьевой компонент / Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин, В. А. Перепелицын // Новые огнеупоры. — 2015. — № 8. — С. 16–23.
- Pivinskii, Yu. E.** Research in the field of preparing molded and unmolded refractories based on high-alumina HCBS. Part 1. High-alumina bauxite as a basic raw material component / Yu. E. Pivinskii, P. V. Dyakin, V. A. Perepelitsyn // Refractories and Industrial Ceramics. — 2015. — Vol. 56, № 4. — P. 344–350.

3. **Пивинский, Ю. Е.** Исследования в области получения формованных и неформованных огнеупоров на основе высокоглиноземистых ВКВС. Часть 2. Характеристика исходных компонентов и отливок на основе ВКВС композиционного состава. Изучение начальной стадии процессов их спекания и муллитизации / Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин // Новые огнеупоры. — 2015. — № 10. — С. 50–57.

- Pivinskii, Yu. E.** Research in the field of preparing molded and unmolded refractories based on high-alumina HCBS. Part 2. Properties of starting components and castings based on composite composition HCBS. Study of the initial stage of sintering and mullitization / Yu. E. Pivinskii, P. V. Dyakin // Refractories and Industrial Ceramics. — 2016. — Vol. 56, № 5. — P. 544–550.

4. **Пивинский, Ю. Е.** Исследования в области получения формованных и неформованных огнеупоров на основе высокоглиноземистых ВКВС. Часть 3. Влияние температуры обжига на спекание и муллитизацию ма-

териалов, полученных на основе ВКВС композиционно-го состава / Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин, Л. В. Остряков // Новые огнеупоры. — 2015. — № 12. — С. 25–33.

5. **Пивинский, Ю. Е.** Исследования в области получения материалов на основе ВКВС плавленного кварца. Часть 1. Сопоставительная оценка и отличительные особенности технологий кварцевой керамики и огнеупоров / Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин // Новые огнеупоры. — 2014. — № 7. — С. 33–40.

**Pivinskii, Yu. E.** Research in the area of preparing materials based on fused quartz HCBS. Part 1. Comparative evaluation and distinguishing features of quartz ceramic and refractory technology / Yu. E. Pivinskii, P. V. Dyakin // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 58, № 4. — P. 311–317.

6. **Пивинский, Ю. Е.** Исследования в области получения материалов на основе ВКВС плавленного кварца. Часть 3. Изучение и совершенствование процесса центробежного формования / Ю. Е. Пивинский // Новые огнеупоры. — 2015. — № 3. — С. 26–37.

**Pivinskii, Yu. E.** Research in the area of preparing materials based on fused quartz HCBS. Part 3. Study and improvement of centrifugal casting / Yu. E. Pivinskii // Refractories and Industrial Ceramics. — 2015. — Vol. 56, № 2. — P. 126–135.

7. **Пивинский, Ю. Е.** Исследования в области получения материалов на основе ВКВС плавленного кварца. Часть 5. Влияние спекания на пористость и прочность материалов / Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин // Новые огнеупоры. — 2015. — № 6. — С. 47–55.

**Pivinskii, Yu. E.** Research in the area of preparing materials based on fused quartz HCBS. Part 5. Effect of sintering on material, porosity and strength / Yu. E. Pivinskii, P. V. Dyakin // Refractories and Industrial Ceramics. — 2015. — Vol. 56, № 3. — P. 296–303.

8. **Пивинский, Ю. Е.** Исследования в области получения материалов на основе ВКВС плавленного кварца.

Часть 6. Влияние температуры обжига на спекание и кристобалитизацию материалов / Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин // Новые огнеупоры. — 2015. — № 7. — С. 22–31.

**Pivinskii, Yu. E.** Research in the area of preparing materials based on fused quartz HCBS. Part 6. Effect of firing temperature on material sintering and cristobalitzation / Yu. E. Pivinskii, P. V. Dyakin // Refractories and Industrial Ceramics. — 2015. — Vol. 56, № 4. — P. 366–373.

9. **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.

**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 // Refractories and Industrial Ceramics. — 2015. — Vol. 56, № 3. — P. 245–253.

10. **Пивинский, Ю. Е.** Керамические и огнеупорные материалы : избр. тр. В 3 т. Т. 2 / Ю. Е. Пивинский. — СПб. : Стройиздат СПб., 2003. — 668 с.

11. **Пивинский, Ю. Е.** Реология дисперсных систем, ВКВС и керамобетоны. Элементы нанотехнологий в силикатном материаловедении : избр. тр. В 3 т. Т. 3 / Ю. Е. Пивинский. — Санкт-Петербург : Политехника, 2012. — 682 с.

12. **Бакунов, В. С.** Керамика из высокоогнеупорных окислов / В. С. Бакунов, В. Л. Балкевич, А. С. Власов [и др.] ; под ред. Д. Н. Полубояринова и Р. Я. Попильского. — М. : Металлургия, 1977. — 304 с. ■

Получено 22.09.15

© Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин,  
Л. В. Остряков, 2016 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



## ICC6 — 6-й международный конгресс по керамике «От лаборатории к производству»

21-25 августа 2016 г.

г. Дрезден, Германия

[www.icc-6.com](http://www.icc-6.com)