

Д. т. н. Ю. Е. Пивинский¹ (✉), П. В. Дякин², А. М. Гороховский³, Л. В. Остряков³

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

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

³ ОАО «Динур», г. Первоуральск, Россия

УДК 666.762.1.017:620.181.428.4

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ФОРМОВАННЫХ И НЕФОРМОВАННЫХ ОГНЕУПОРОВ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОГЛИНОЗЕМИСТЫХ ВКВС. Часть 10. Влияние температуры обжига на свойства материалов, полученных на основе ВКВС смешанного состава из плавленного бокситокорунда, кварцевого стекла, реактивного глинозема*

Изучено влияние температуры обжига на свойства материалов, полученных на основе ВКВС сложного состава с различным содержанием Al_2O_3 и SiO_2 . Для материалов всех составов установлены три характерных интервала температур изотермического обжига: преимущественного спекания или усадки (900–1200 °С), преимущественной муллитизации, сопровождаемой ростом (1200–1400 °С), и спекания замуллитизированного материала (1400–1600 °С). Приведен сопоставительный анализ спекания и муллитизации материалов в режимах неизотермического нагрева и изотермического обжига. Установлено, что уже в процессе нагрева до заданной температуры обжига отмечается заметное уменьшение пористости и существенное спекание или муллитизация.

Ключевые слова: боксит, бокситокорунд, реактивный глинозем, ВКВС, кварцевое стекло, спекание, усадка, муллитизация, рост, неизотермический нагрев.

В предыдущей статье [1] настоящей серии публикаций приведены данные о получении плавленного бокситокорунда как базового компонента ВКВС композиционного состава. На образцах с различным содержанием Al_2O_3 и SiO_2 проведены dilatометрические исследования, позволившие установить интервалы температур их спекания (усадки) и муллитизации (роста). Цель настоящей работы — изучение влияния температуры изотермического обжига в интервале 900–1600 °С на некоторые свойства тех же материалов, проведение сопоставительного анализа показателей спекания (усадки) и муллитизации (роста) в режиме неизотермического нагрева до 1500 °С и обжига с изотермической выдержкой 1 ч.

* Продолжение. Части 1–3 статьи опубликованы в журнале «Новые огнеупоры» № 8, 10, 12 за 2015 г., части 4–8 — в № 2, 4, 6, 10 и 12 за 2016 г., часть 9 — в № 2 за 2017 г.



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

Влияние температуры изотермического обжига на свойства материалов

Как и в предыдущих работах [1–5], образцы в виде отливок размерами 10×10×80 мм после их сушки подвергали обжигу в электропечи в интервале 900–1600 °С с изотермической выдержкой при заданной температуре 1 ч. Химический состав и другие характеристики исходных отливок приведены в статье [1]. После обжига образцов определяли показатели их линейной усадки или роста, открытой пористости, кажущейся плотности и предела прочности при изгибе. На рис. 1 представлена зависимость этих показателей от температуры обжига образцов как исходного состава, так и с содержанием 10, 20 и 30 % реактивного глинозема.

Изученные показатели для материалов всех составов существенно изменяются в трех характерных интервалах температур. В интервале 900–1200 °С отмечается преимущественное спекание материалов, сопровождаемое усадкой, а соответственно, уменьшением пористости, ростом плотности и прочности. В интервале 1200–1400 °С, соответствующем процессу муллитизации, сопровождающейся ростом, отмечается рост пористости, падение плотности и прочности. Спекание замуллитизированного материала соответствует интервалу 1400–1600 °С.

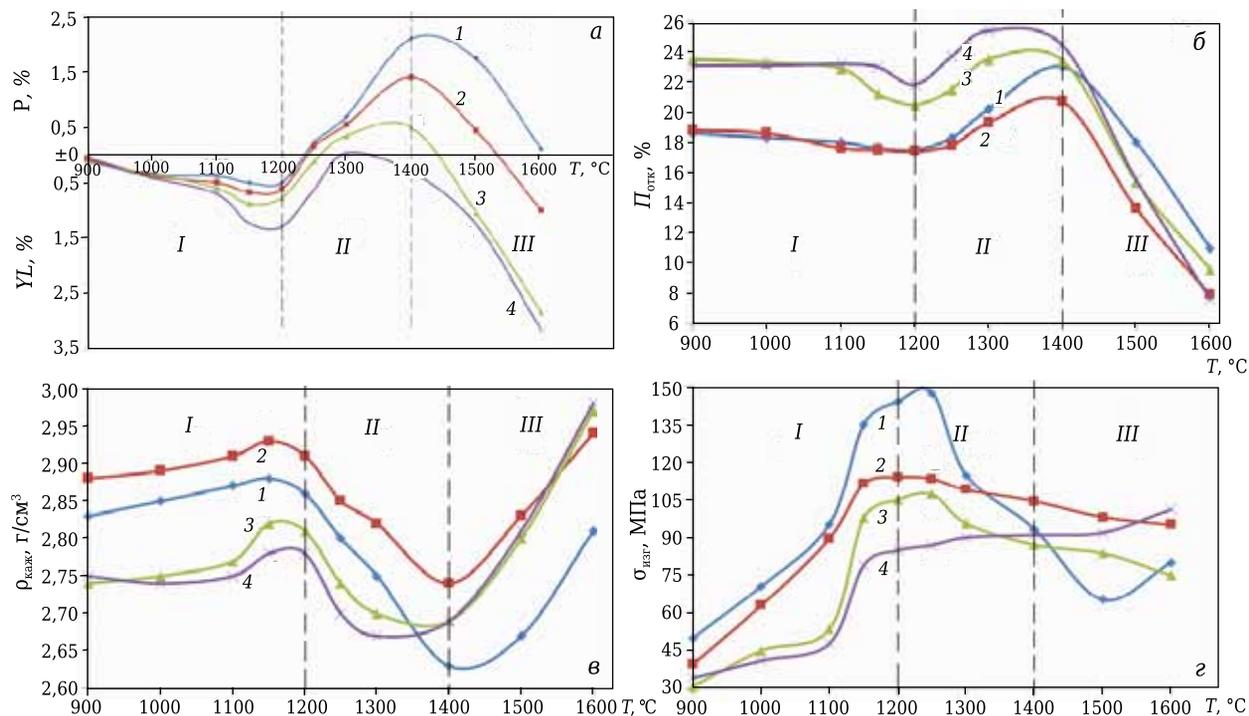


Рис. 1. Влияние температуры обжига T на показатели усадки Y_L или роста P (а), открытой пористости (б), кажущейся плотности (в) и предела прочности при изгибе (г) образцов на основе ВКВС плавленного бокситокорунда (1), а также образцов с дополнительным содержанием 10, 20 и 30 % глинозема СТС-30 (2–4); I, II, III — интервалы температур: I — преимущественного спекания (усадки); II — преобладающей муллитизации (роста); III — спекания замуллитизированного материала

Из данных, представленных на рис. 1, а, следует, что минимальные значения усадки (0,05–0,1 %) для образцов всех составов отмечаются уже после их термообработки при 900 °С, более значительные (0,35–0,40) — после 1000 °С. Следует отметить, что исходные образцы в высушенном состоянии содержали определенное количество химически связанной воды. Вследствие этого потери их при прокаливании (900–1100 °С) находились в пределах 0,40–0,45 %. Поэтому пористость образцов после обжига при 900 и 1000 °С оказалась несколько выше (на 1–1,5 %), чем $P_{отк}$ отливок [1]. Максимальная усадка для образцов всех составов достигается после их обжига при 1150 и 1200 °С. При этом показатели Y_L минимальны для образцов, соответствующих кривой 1 на рис. 1 (0,5 %), а максимальные (1,23–1,29 %) — для образцов с содержанием 30 % глинозема СТС-30 (кривая 4). Для кривых 2 и 3 на рис. 1 показатели Y_L в этом интервале температур находятся в пределах 0,6–0,9 %.

Повышение температуры обжига до 1250 °С сопровождается существенным ростом образцов, который в значительной степени компенсирует их предшествующую усадку. Поэтому показатели усадки образцов в зависимости от их состава уменьшаются до 0,11–0,62 %. При повышении температуры до 1300 °С предшествующая усадка компенсируется полностью и образцы всех составов проявляют рост от 0,04 (кривая 4) до 0,7 (кривая 1). Максимальные показатели

роста образцов, соответствующих кривым 1–3, достигаются после их обжига при 1400 °С. Максимальный рост (2,1 %) отмечается для образцов, не содержащих глинозем (кривая 1), рост образцов с содержанием глинозема 10 и 20 % 1,4 и 0,5 % соответственно.

Из рис. 1, а следует, что эффект муллитизации образцов, косвенно оцениваемый показателем их роста, тем ниже, чем выше содержание в их составе глинозема СТС-30. В соответствии с кривой 4 максимальное значение роста, отмеченное при 1300 °С, составляет только 0,04 %, при 1400 °С в отличие от показателей кривых 1–3 отмечается заметная усадка (0,3 %).

С точки зрения количественной оценки эффекта муллитизации следует учитывать показатели роста не только по сравнению с исходным (т. е. выше нулевой точки), но и с учетом роста, компенсирующего их предварительную усадку. Тогда показатели роста для образцов, соответствующих кривым 1–4, составляет 2,60, 2,07, 1,35 и 1,30 % соответственно. Значительная степень спекания предварительно замуллитизированных образцов отмечается при 1500 и 1600 °С. Конечные (после 1600 °С) значения усадки тем выше, чем выше в образцах содержание Al_2O_3 . Так, для кривых 2–4 усадка составляет 1,0, 2,83 и 3,15 % соответственно. Для образца исходного состава (кривая 1) в процессе спекания и усадки показатель роста уменьшается с 2,1 до 0,11 %. Усадка образцов с учетом компенсации предше-

ствующего роста (кривые 1–4) составит 2,0, 2,4, 3,18 и 3,20 % соответственно.

На рис. 1, б показана зависимость открытой пористости $P_{отк}$ образцов от температуры их обжига. Для исходных образцов (термообработка при 900 °С) $P_{отк}$ в существенной мере определяется их исходным составом. Если значения $P_{отк}$ для образцов с составами, соответствующими кривым 1 и 2, практически совпадают (18,6 и 18,8 %), то для образцов с повышенным содержанием Al_2O_3 (кривые 3, 4) открытая пористость существенно выше (около 24 %).

Заметное уменьшение пористости образцов отмечается после их обжига при 1100 °С, минимальные значения $P_{отк}$ (17,5 для образцов, соответствующих кривым 1 и 2, и 21–22 % — кривым 3 и 4) достигаются при 1200 °С. В соответствии с данными по показателям роста образцов (см. рис 1, а) в интервале 1250–1400 °С характерно увеличение пористости. Существенное понижение $P_{отк}$ образцов всех составов отмечается при 1500 и 1600 °С. Характерно, что максимальным значением $P_{отк}$ после 1600 °С (11,0 %) отличаются образцы исходного состава (кривая 1), минимальным — образцы с содержанием 30 % Al_2O_3 (7,6 %).

Влияние температуры обжига на кажущуюся плотность образцов $\rho_{каж}$ представлено на рис. 1, в. В соответствии со значениями усадки и $P_{отк}$ (рис. 1, а, б) максимальные значения $\rho_{каж}$ соответствуют температурам обжига 1150 и 1200 °С, а минимальные — 1300 и 1400 °С (кривые 3 и 4) или 1400 °С (кривые 1 и 2). Резкий рост плотности образцов всех составов отмечается при 1500 и 1600 °С. Минимальными значениями $\rho_{каж}$ (2,81 г/см³) после обжига при 1600 °С характеризуются образцы исходного состава (кривая 1), что обусловлено не только их относительно большей пористостью, но и меньшим значением истинной плотности материала по сравнению с плотностью образцов с повышенным содержанием Al_2O_3 . Сопоставляя значения $P_{отк}$, $\rho_{каж}$ и ориентировочно оценивая фазовый состав образцов после их обжига при 1600 °С, можно предположить, что значения закрытой пористости изученных материалов 6–8 %.

На рис. 1, г показано влияние температуры обжига на предел прочности при изгибе образцов. После относительно низкотемпературной обработки (900 °С) образцы всех изученных материалов характеризуются достаточно высокими значениями $\sigma_{изг}$ — 30–50 МПа в зависимости от их состава. Резкий рост прочности образцов материалов, соответствующих кривым 1 и 2 (исходные и с 10 % СТС-30) отмечается при повышении температуры обжига до 1000 и 1100 °С. В этом же интервале температур изменение прочности образцов с содержанием 20 и 30 % СТС-30 (кривые 3 и 4) незначительно.

В области температур обжига 1150–1250 °С интенсивный рост $\sigma_{изг}$ (кривые 1–3) достигается для образцов, обожженных при 1200–1250 °С.

Образцы с максимальным содержанием СТС-30 (кривая 4) в отличие от материалов, соответствующих кривым 1–3, имеют другой характер зависимости. Если на кривых 1–3 после повышения температуры обжига образцов до 1300 °С отмечается заметное падение значений $\sigma_{изг}$, то на кривой 4 по мере повышения температуры обжига вплоть до 1600 °С прочность возрастает.

Из рис. 1, г следует, что интенсивность падения прочности образцов, соответствующих кривым 1–3, по мере повышения температуры обжига выше 1250 °С существенно различается. Это обусловлено прежде всего их составом (содержанием Al_2O_3 и SiO_2), определяющим объем образующегося с эффектом роста вторичного муллита [5–7]. Если для образцов, не содержащих глинозем СТС-30 (кривая 1), при повышении температуры с 1250 до 1500 °С значения $\sigma_{изг}$ уменьшаются в 2,3 раза, то для образцов, содержащих глинозем (кривые 2 и 3), падение $\sigma_{изг}$ незначительно (15–17 %). Предел прочности при изгибе материала с максимальным содержанием Al_2O_3 (кривая 4) в отличие от образцов предыдущих составов при высоких температурах обжига возрастает.

Для материалов всех составов при повышении температуры обжига с 1400 до 1600 °С, как это следует из рис. 1, наблюдается существенное понижение пористости и рост $\rho_{каж}$, что свидетельствует о протекании вторичного процесса спекания материала, содержащего определенный объем образованного в интервале температур обжига 1300–1400 °С вторичного муллита. Как следует из рис. 1, г, повышение температуры с 1500 до 1600 °С сопровождается ростом $\sigma_{изг}$, что обусловлено резким снижением пористости в этом интервале температур. Как следует из рис 1, б, понижение $P_{отк}$ при этом находится в пределах 4–7 %.

На рис. 2 представлена зависимость показателей $\sigma_{изг}$ образцов от содержания в них СТС-30 после обжига при различных температурах. При температурах обжига 1000–1250 °С (кривые 1–4) по мере роста содержания СТС-30 в образцах $\sigma_{изг}$ их по сравнению с исходным показате-

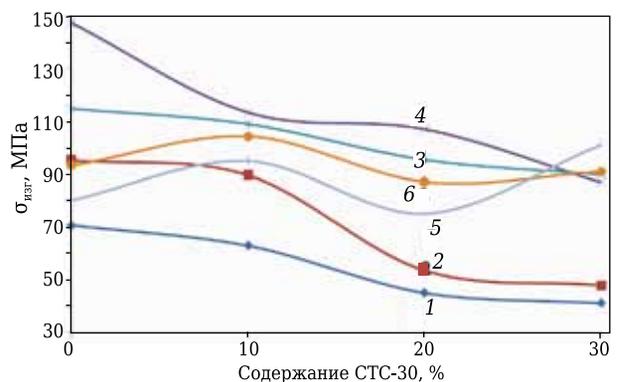


Рис. 2. Влияние содержания глинозема СТС-30 в исходных образцах на их $\sigma_{изг}$ после обжига при температурах, °С: 1 — 1000; 2 — 1100; 3 — 1150; 4 — 1250; 5 — 1400; 6 — 1600

лем уменьшаются в 1,7–2 раза. Между тем при 1400 и 1600 °С (кривые 5 и 6) закономерность меняется и образцы с 10 % СТС-30 характеризуются большим значением $\sigma_{изг}$, чем исходные. Для образцов с 30 % СТС-30 после обжига при 1400 °С (кривая 5) $\sigma_{изг}$ на 30 % превышает этот показатель исходного образца.

Образцы всех составов на основе ВКВС плавленного бокситокорунда были подвергнуты длительному обжигу в печи для обжига диносовых изделий. Образцы в зоне температур 1300–1390 °С находились около 50 ч. На рис. 3 показана зависимость усадки Y_L , открытой пористости $P_{отк}$, кажущейся плотности $\rho_{каж}$ и предела прочности при изгибе от содержания СТС-30 в образцах на основе ВКВС плавленного бокситокорунда после столь продолжительной термообработки.

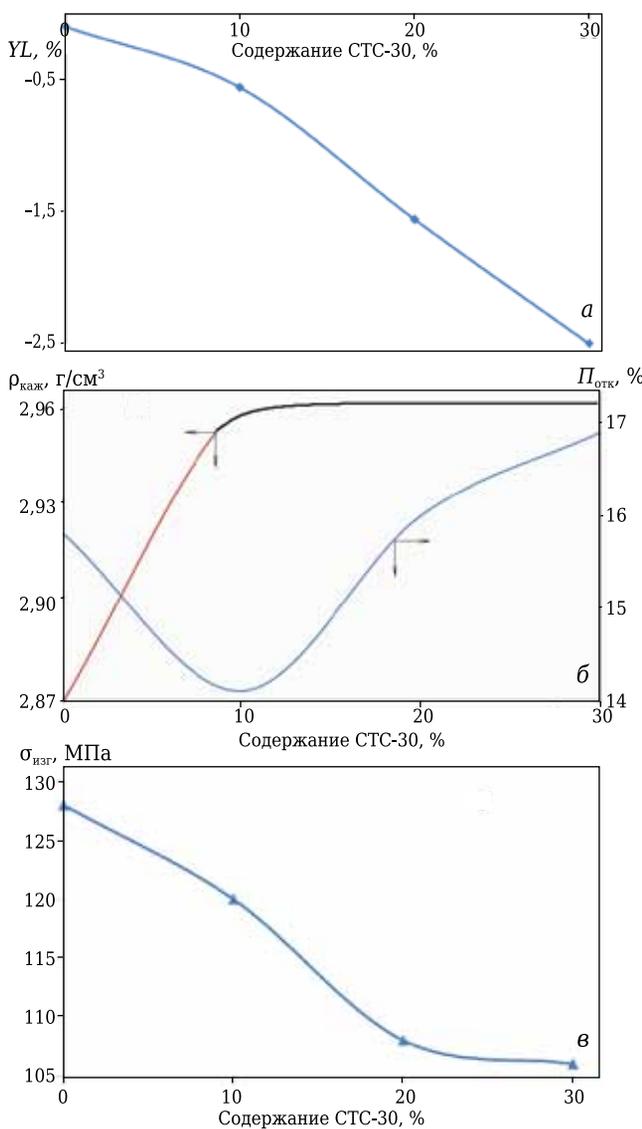


Рис. 3. Влияние содержания глинозема СТС-30 на показатели линейной усадки (а), кажущейся плотности и открытой пористости (б) и предела прочности при изгибе (в) образцов после их продолжительного (около 50 ч) пребывания в интервале температур 1300–1390 °С в процессе обжига в печи для диносовых изделий

Из рис. 3 следует, что показатели усадки определяются составом исходных образцов. Если образцы исходного состава характеризуются весьма низкой (0,11 %) усадкой, то по мере увеличения содержания в них СТС-30 с 10 до 20 и 30 % Y_L увеличивается с 0,7 до 2,04 и 2,87 % соответственно. В отличие от отмеченной зависимости для усадки минимальной открытой пористостью (14 %) обладают образцы с 10 % СТС-30, а максимальной (17 %) образцы с максимальным содержанием глинозема (30 %). Минимальной кажущейся плотностью $\rho_{каж}$ (2,87 г/см³) характеризуются исходные образцы. Уровень $\rho_{каж}$ образцов, содержащих глинозем, существенно выше (2,94–2,95 г/см³), что объясняется не только пониженной пористостью образцов с 10 % СТС-30, но и преимущественно фазовым составом сопоставимых материалов. По мере роста количества СТС-30 материалы характеризуются пониженным содержанием муллита истинной плотностью около 3,15 г/см³ и повышенным — корунда плотностью около 4,0 г/см³.

Несмотря на минимальное значение $\rho_{каж}$ образцы исходного состава (см. рис. 3, в) характеризуются максимальным значением $\sigma_{изг}$ (128 МПа). По мере увеличения содержания СТС-30 показатели $\sigma_{изг}$ образцов уменьшаются несмотря на то, что их $P_{отк}$ при этом или сопоставимы (при 20 и 30 % СТС), или ниже (при 10 % СТС-30). Причины и механизм отмеченной особенности нуждаются в дополнительных исследованиях.

Сопоставительный анализ спекания и муллитизации в режимах неизотермического нагрева и изотермической выдержки

В работах [4, 5] показана целесообразность сопоставительного анализа показателей усадки и роста материалов при их неизотермическом нагреве в dilatометре и изотермической выдержке при обжиге. Благодаря проведенному анализу была получена дополнительная информация, касающаяся механизма спекания и образования вторичного муллита.

На основе данных о влиянии температуры изотермического обжига на свойства материалов (см. рис. 1) и аналогичных данных по неизотермическому нагреву до 1500 °С, приведенных в статье [1], представлены (рис. 4–6) сопоставительные данные об усадке и росте образцов как на основе исходной ВКВС (рис. 4), так и с содержанием 10 (рис. 5) и 30 % СТС-30 (рис. 6).

Для материалов, изученных в настоящей работе, характерно весьма интенсивное спекание на стадии неизотермического нагрева (рис. 4–6), что раньше отмечалось также для образцов кварцевой керамики [8]. На рис. 4 приведены сопоставительные данные по показателям усадки и роста образцов неизотермического

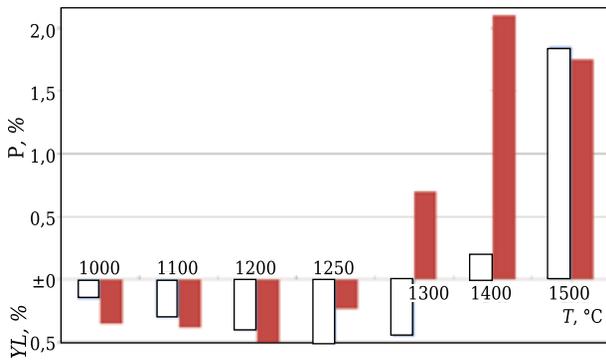


Рис. 4. Влияние температуры T неізотермического нагрева (□) и ізотермической выдержки на протяжении 1 ч (■) на показатели усадки Y_L или роста P образцов на основе ВКВС бокситокорунда

нагрева и ізотермической выдержки в области температур 1000–1500 °C для образцов на основе ВКВС бокситокорунда.

Доля усадки в процессе нагрева до заданной температуры обжига постепенно увеличивается от 40 % при 1000 °C до 80 % при 1200 °C. При 1250 °C усадка в процессе неізотермического нагрева более чем в 2 раза превышает усадку ізотермического обжига при той же температуре. Этот факт свидетельствует о том, что в интервале 1200–1250 °C в процессе ізотермической выдержки отмечается заметная муллитизация, сопровождаемая определенным ростом.

При 1300 °C отмеченная разница существенно возрастает, вследствие чего в первом случае еще проявляется значительная усадка (0,45 %), а во втором — еще больший рост (0,7 %). Начало роста образца при неізотермическом нагреве отмечается только при 1400 °C (0,2 %). Рост образца, обожженного при этой температуре, достигает максимального значения (2,1 %).

Если для образцов ізотермического обжига муллитизация происходит преимущественно в области температур 1300–1400 °C, то при неізотермическом нагреве этот интервал 1400–1500 °C. В области высоких температур (см. рис. 4) рост охлажденного образца после его неізотермического нагрева до 1500 °C составляет 1,85 %, что несколько выше этого показателя образца после ізотермического обжига (1,73 %). Разница обусловлена заметным спеканием (усадкой) замуллитизированного материала.

Усадка образцов на основе ВКВС бокситокорунда с 10 % глинозема СТС-30 при 1000, 1100 и 1200 °C ізотермического нагрева до заданной температуры со скоростью 5 °C/мин и при ізотермической выдержке при той же температуре в течение 1 ч постепенно увеличивается. Однако разница в показателях усадки при этом сокращается. Если при 1000 °C доля усадки образца при нагреве от аналогичной для обожженного образца только 26 %, то при 1100 °C 46 %, при 1200 °C 68 %. При температуре 1250 °C

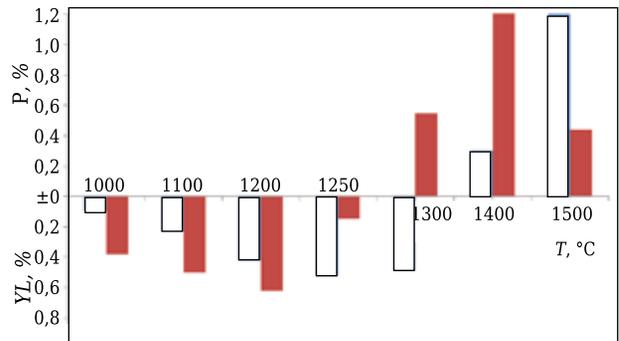


Рис. 5. Влияние температуры T неізотермического нагрева (□) и ізотермической выдержки на протяжении 1 ч (■) на показатели усадки Y_L или роста P образцов на основе ВКВС бокситокорунда с 10 % глинозема СТС-30

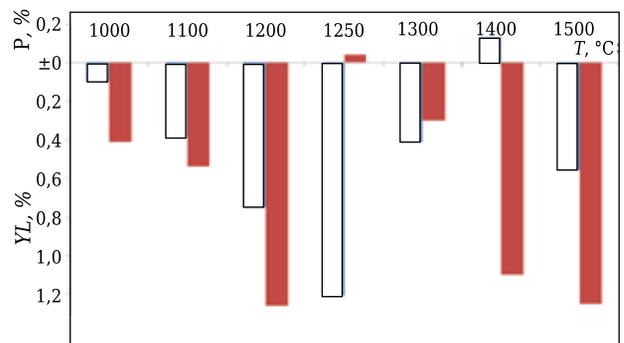


Рис. 6. Влияние температуры T неізотермического нагрева (□) и ізотермической выдержки на протяжении 1 ч (■) на показатели усадки Y_L или роста P образцов на основе ВКВС бокситокорунда с 30 % глинозема СТС-30

отмечается обратная зависимость — усадка при неізотермическом нагреве (0,52 %) превышает усадку для обожженного при той же температуре образца в 3,5 раза.

Рассмотренная закономерность изменения усадки обусловлена тем обстоятельством, что в интервале температур 1100–1200 °C параллельно с протеканием процесса спекания отмечается начальная стадия муллитизации материала, сопровождаемая определенным ростом его объема. Процесс резко ускоряется по мере повышения температуры. Поэтому измеряемый уровень усадки при 1250 °C оказывается в 4 раза ниже, чем после температуры 1250 °C. Для образцов неізотермического нагрева показатели усадки увеличиваются вплоть до 1250 °C и только при 1300 °C несколько (на 0,1 %) уменьшаются. Обусловлено это тем, что с учетом скорости подъема температуры (300 °C/ч) общая продолжительность пребывания в «активном» для возможной муллитизации интервале температур 1100–1250 °C составляет только 30 мин, а в интервале 1100–1300 °C — 40 мин. По всей видимости, с учетом анализируемых данных об усадках муллитизация в процессе неізотермического нагрева материала начинается в интервале

1250–1300 °С, тогда как для образцов, подвергнутых изотермическому обжигу, — в интервале 1150–1200 °С. Исходя из данных об усадках при 1250 °С вполне обоснованно предположить, что при этой температуре изотермического обжига неизмеряемый уровень роста образца за счет муллитизации составляет около 0,35 %. Это предположение вытекает из следующего. Скорость нагрева образцов до заданной температуры изотермической выдержки такая же, как в dilatометре (300 °С/ч). Поэтому перед началом выдержки при 1300 °С обжигаемый образец по аналогии со значениями для неизотермического нагрева уже характеризуется усадкой 0,52 %, а после 1-ч изотермической выдержки за счет роста в процессе муллитизации измеряемый уровень усадки уменьшается до 0,15 %.

При 1300 °С усадка образца по сравнению с показателем при 1250 °С значительно (на 0,03 %) понижается, что свидетельствует о начальной стадии муллитизации. Для материала изотермического обжига вследствие значительной муллитизации отмечается рост на 0,55 %. При 1400 °С измеряемый уровень роста достигает 0,3 %, для образца после изотермического обжига он многократно выше (1,4 %). Примечательно, что при 1500 °С для образца изотермического нагрева достигается такой же показатель роста как для образца, обожженного при 1400 °С (1,4 %). Характерно, что при повышении температуры изотермического обжига до 1500 °С протекает повторный процесс спекания предварительно замуллитизированного материала и поэтому измеряемый показатель роста образца понижается до 0,44 %. Образец dilatометрического нагрева характеризуется показателем роста 1,2 %, что следует из разницы показателей на рис. 5, □, ■.

При повышении содержания глинозема СТС-30 в ВКВС комплексного состава до 30 % поведение материала при неизотермическом нагреве и изотермическом обжиге существенно изменяется (см. рис. 6). Для материала этого состава по сравнению с материалами без СТС-30 и с содержанием 10 % СТС-30 характерны более значительные показатели усадки в области температур как первичного спекания (предшествующего муллитизации), так и вторичного (1400–1600 °С). Кроме того, для материала этого состава эффект роста проявляется в значительно меньшей степени, чем для образцов других составов.

Показатели усадки при неизотермическом нагреве при 1000, 1100, 1200 и 1300 °С составляют 0,1, 0,39, 0,75 и 1,21 % соответственно. При 1400 °С отмечается процесс муллитизации, который сопровождается трехкратным уменьшением значения измеряемой усадки (0,41 %).

Для материалов изотермического обжига максимальное значение усадки (1,26 %) отмечается при 1200 °С, при повышении температуры

до 1300 °С вследствие муллитизации полностью компенсируется предшествующая усадка и проявляется незначительный рост.

Характерно, что процесс спекания материала в изотермическом режиме отмечается уже при 1400 °С (усадка 0,3 %), при 1500 °С усадка достигает 1,25 %. Для материала неизотермического нагрева измеряемая величина роста при 1470 °С составляет 0,13 %, при 1500 °С отмечается заметная (0,27 %) усадка, свидетельствующая о вторичном спекании предварительно замуллитизированного материала.

Следует отметить, что менее значительный эффект муллитизации материала рассматриваемого состава обусловлен существенно меньшим содержанием в нем SiO₂ и значительно большим количеством Al₂O₃. А именно соотношение этих оксидов определяет объем образующегося при обжиге вторичного муллита [1, 3–6].

На основе ВКВС смешанного состава (плавный бокситокорунд + ВДКС) в ОАО «Динур» разработана технология изготовления огнеупорных масс для монолитных футеровок желобов доменных печей. Массы успешно испытаны и применяются на ряде металлургических предприятий РФ [9].

Таким образом, на основе плавного бокситокорунда и высокодисперсного кварцевого стекла получены ВКВС с высокими реотехнологическими свойствами. Изготовлены образцы материалов на основе этой ВКВС, а также с дополнительным содержанием в них 10, 20 и 30 % реактивного глинозема СТС-30. На образцах были изучены процессы спекания и муллитизации в режиме как неизотермического нагрева (dilatометрические исследования), так и изотермического обжига в интервале температур 900–1600 °С с выдержкой 1 ч. Для материалов всех составов установлены три характерных интервала температур изотермического обжига: преимущественного спекания или усадки (900–1200 °С), преимущественной муллитизации, сопровождаемой ростом (1200–1400 °С), и спекания замуллитизированного материала (1400–1600 °С). В интервале температур обжига 1100–1250 °С материалы исходного состава характеризуются $\sigma_{изг} = 95 \div 150$ МПа и незначительной (0,3–0,5 %) усадкой.

(Продолжение следует)

Библиографический список

1. **Пивинский, Ю. Е.** Исследования в области получения формованных и неформованных огнеупоров на основе высокоглиноземистых ВКВС. Часть 9. Получение и свойства смешанных ВКВС состава: плавный бокситокорунд, кварцевое стекло, реактивный глинозем. Dilатометрические исследования материалов на их основе / Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин, А. Ю. Колбов // Новые огнеупоры. — 2017. — № 2. — С. 39–45.

2. **Пивинский, Ю. Е.** 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 / Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин, Л. В. Остряков // Новые огнеупоры. — 2016. — № 4. — С. 24–29.

Pivinskii, Yu. E. Research in the field of preparing molded and unmolded refractories based on high-alumina HCBS. Part 5. Effect of firing temperature on properties of materials prepared from composite HCBS with addition of refractory clay / Yu. E. Pivinskii, P. V. Dyakin, L. V. Ostryakov // Refractories and Industrial Ceramics. — 2016. — Vol. 57, № 2. — P. 180–184.

3. **Пивинский, Ю. Е.** Исследования в области получения формованных и неформованных огнеупоров на основе высокоглиноземистых ВКВС. Часть 6. О процессе муллитизации и тепловом расширении материалов на основе ВКВС композиционного состава / Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин, А. Ю. Колобов // Новые огнеупоры. — 2016. — № 6. — С. 31–38.

Pivinskii, Yu. E. Research in the field of preparing molded and unmolded refractories based on high-alumina HCBS. Part 6. Mullitization and thermal expansion of materials based on compound composition HCBS / Yu. E. Pivinskii, P. V. Dyakin, A. Yu. Kolobov // Refractories and Industrial Ceramics. — 2016. — Vol. 57, № 3. — P. 297–303.

4. **Пивинский, Ю. Е.** Исследования в области получения формованных и неформованных огнеупоров на основе высокоглиноземистых ВКВС. Часть 7. О спекании и вторичном муллитобразовании материалов на основе ВКВС композиционного состава в процессе неизоотермического нагрева и изотермического обжига / Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин // Новые огнеупоры. — 2016. — № 10. — С. 42–51.

5. **Пивинский, Ю. Е.** Исследования в области получения формованных и неформованных огнеупоров на основе высокоглиноземистых ВКВС. Часть 8. Влияние температуры обжига на свойства материалов, полученных на основе смешанных ВКВС состава: боксит, кварцевое стекло, реактивный глинозем / Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин // Новые огнеупоры. — 2016. — № 12. — С. 26–35.

6. **Пивинский, Ю. Е.** Исследования в области получения формованных и неформованных огнеупоров на основе высокоглиноземистых ВКВС. Часть 3. Влияние температуры обжига на спекание и муллитизацию материалов, полученных на основе ВКВС композиционного состава

/ Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин, Л. В. Остряков // Новые огнеупоры. — 2015. — № 12. — С. 25–33.

Pivinskii, Yu. E. Research in the field of preparing molded and unmolded refractories based on high-alumina HCBS. Part 3. Effect of firing temperature on sintering and mullitization of materials prepared on the basis of composite HCBS / Yu. E. Pivinskii, P. V. Dyakin, L. V. Ostryakov // Refractories and Industrial Ceramics. — 2015. — Vol. 56, № 6. — P. 648–655.

7. **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.

Pivinskii, Yu. E. Research in the field of preparing molded and unmolded refractories based on high-alumina HCBS. Part 4. Effect of refractory clay addition on properties of compound composition HCBS, castings and materials based on them / Yu. E. Pivinskii, P. V. Dyakin // Refractories and Industrial Ceramics. — 2016. — Vol. 57, № 1. — P. 70–76.

8. **Пивинский, Ю. Е.** Исследования в области получения материалов на основе ВКВС плавленного кварца. Часть 4. Изучение кинетики изотермического и неизотермического спекания / Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин // Новые огнеупоры. — 2015. — № 4. — С. 20–28.

Pivinskii, Yu. E. Research in the area of preparing materials based on fused quartz HCBS. Part 4. Study of isothermal and nonisothermal sintering kinetics / Yu. E. Pivinskii, P. V. Dyakin // Refractories and Industrial Ceramics. — 2015. — Vol. 56, № 2. — P. 172–179.

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. ■

Получено 14.06.16

© Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин,
А. М. Гороховский, Л. В. Остряков, 2017 г.

Поправка

В журнале «Новые огнеупоры» № 1 за 2017 г. на с. 72 из списка предприятий следует исключить Азовэлектросталь (электросталеплавильное производство), ММК им. Ильича (мартеновское и кислородно-конвертерное производство) и Азовсталь (мартеновское и кислородно-конвертерное производство), поскольку эти предприятия не входят в состав промышленности России.