Д. т. н. Ю. Е. Пивинский¹ (🖂), П. В. Дякин², А. Ю. Колобов³

 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 Свердловской обл., Россия

УДК 666.762.2.046.512:66.046.44

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ПОЛУЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ВКВС ПЛАВЛЕНОГО КВАРЦА. Часть 10. О некоторых свойствах кристобалитсодержащих материалов^{*}

Изучено влияние повторного неизотермического нагрева до 1500 °С на усадку и кристаллизацию образцов кварцевой керамики с щелочной добавкой (0,5 % Na₂O) и монолитного плавленого кварца. В образцах с щелочной добавкой с преимущественным содержанием кристобалита обнаружено заметное (до 10 %) образование тридимита. Приведены некоторые свойства образцов после их однократного нагрева до 1500 °С. В зависимости от содержания добавки образцы характеризовались открытой пористостью 6–9 % и пределом прочности при сжатии 130–185 МПа.

Ключевые слова: плавленый кварц, кристобалит, тридимит, сталеразливочные огнеупоры, прочность при изгибе и сжатии.

В предыдущих статьях [1, 2] настоящей серии публикаций показано влияние щелочных добавок (в виде порошка силикат-глыбы) на спекание, кристобалитизацию и тепловое расширение материалов после их однократного неизотермического нагрева до 1500 °C со скоростью 5 °C/мин. Между тем применительно к новой технологии кварцевых огнеупоров, которая будет рассмотрена в следующей статье, важным является вопрос о влиянии на процессы спекания и кристобалитизации более продолжительной выдержки материала в области высоких температур.

ВЛИЯНИЕ ПОВТОРНОГО НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОГО НАГРЕВА НА СПЕКАНИЕ И КРИСТОБАЛИТИЗАЦИЮ МАТЕРИАЛА

Основные исследования по влиянию повторного неизотермического нагрева проведены на образцах, содержащих добавку 2 % силикатглыбы, или 0,5 % Na₂O. В предыдущей статье [2, рис. 5, ∂] были представлены данные по влиянию первичного нагрева до 1500 °C на спекание

^{*} Часть 1 статьи опубликована в № 7 за 2014 г., части 2-7 в № 1, 3, 4, 6, 7 и 9 за 2015 г., части 8 и 9 в № 1 и 3 за 2016 г.



и кристобалитизацию образцов, содержащих 0,5 % Na₂O, с последующим нагревом закристобалитизированного образца до 1000 °C. В настоящем исследовании образец с указанным «тепловым прошлым» подвергали как повторному неизотермическому нагреву до 1500 °C. так и последующему нагреву после предварительного охлаждения до 1000 °С. Экспериментальные данные показаны на рис. 1-3. Ход кривой роста образца до 1000 °С (см. рис. 1) аналогичен ходу кривой 1 рис. 5, ∂ [2] для такого же образца. Выше 1000 °C отмечается заметная усадка образца, которая при 1200, 1300, 1400 и 1500 °С достигает значений 0,05, 0,11, 0,14 и 0,24 % соответственно. Это свидетельствует о том, что предварительно закристобалитизированный (~95 %) и частично спеченный материал в про-







Рис. 2. Влияние температуры неизотермического нагрева на относительное изменение размеров образца с добавкой 2 % силикат-глыбы в процессе повторной термообработки до 1500 °C со скоростью подъема температуры 5 °C/мин



Рис. 3. Температурная зависимость роста образца с добавкой 2 % силикат-глыбы после двукратной термообработки до 1500 °С (скорость нагрева до 1000 °С 25 °С/мин). Точки 1-3 на пиках дифференциальной кривой соответствуют переходам $\alpha \rightarrow \beta$ -тридимит (1), $\beta \rightarrow \alpha$ -тридимит (2) и $\beta \rightarrow \alpha$ -кристобалит (3)

цессе последующего нагрева спекается дополнительно, чему способствует присутствие в нем значительного количества Na₂O (~0,5 %).

На рис. 2 показаны кривые относительного изменения размеров образца с 2 % силикатглыбы в процессе повторной термообработки как при его нагреве, так и при охлаждении. Из сопоставления прямого (кривая 1) и обратного хода (кривая 2) кривых в интервале 250-1100 °C между ними отмечается разница размеров образца около 0,25 %. Примечателен тот факт, что согласно обратному ходу кривой 2 (см. рис. 2) показатель линейного расширения образца в интервале 500-1000 °C составляет около 0,07 %, а в интервале 1000-1500 °С он отсутствует. Это свидетельствует о высокой термостойкости закристобалитизированных в процессе эксплуатации кварцевых сталеразливочных огнеупоров в интервале температур вплоть до 300 °С. Это обусловлено тем, что тепловое расширение высокотемпературного кристобалита и плавленого кварца сопоставимо. Например, теплозащитные кварцевые керамобетонные трубы для

защиты струи металла при его выпуске из сталеразливочного ковша в процессе испытаний на НЛМК достигали средней стойкости 5 плавок, что сопоставимо со стойкостью аналогичных корундографитовых труб или превышает ее [3-6]. При этом в период между плавками температура кварцевых труб за относительно короткое время снижалась от 1550–1570 до 300–500 °С и наоборот (при очередной разливке), т. е. трубы с низким значением ТКЛР подвергались достаточно резким циклическим термоударам.

Пля определения влияния дополнительной высокотемпературной обработки (см. рис. 1) образец в последующем после охлаждения подвергали неизотермическому нагреву до 1000 °C со скоростью нагрева 25 °С/мин (см. рис. 3). Из сопоставления аналогичных кривых роста закристобалитизированных образцов после однократного [2, рис. 5, ∂] и двукратного (см. рис. 1) нагрева до 1500 °C следует отметить некоторые их различия. У образца с дополнительной термообработкой пиковое значение роста (точка 3) соответствует 240 °С (230 °С, см. рис. 5, ∂ [2]), что свидетельствует о более совершенной или упорядоченной структуре кристобалита [3, 7, 8]. Показатель роста образца при 300 °C 1,42 % несколько выше, чем у образца с однократной термообработкой при 1500 °C [2]. Из дифференциальной кривой рис. З следует, что кроме основного пика («кристобалитового») при 125 и 175 °С отчетливо проявляются и дополнительные. Предположительно, эта аномалия может быть связана с переходом части материала в тридимит, что инициируется достаточно высоким содержанием в нем Na₂O (~0,5 %) и длительным пребыванием материала в области повышенных температур.

Как следует из данных [9, с. 22], тридимит характеризуется двумя низкотемпературными превращениями, которые, подобно кристобалитовому переходу, протекают в некотором температурном интервале, зависящем прежде всего от состава минерализатора. Согласно табличным данным [9, с. 22], температура перехода α→βтридимит преимущественно колеблется в пределах 100-140 °C, а перехода β→α-тридимит — в пределах 140-190 °C, т. е. отмеченные на дифференциальной кривой рис. З пики 1 и 2 при 125 и 175 °С вполне вписываются в указанные температурные интервалы. Возможность частичного образования тридимита в плавленом кварце с добавкой 2 % силикат-глыбы можно предположить, исходя из известных экспериментальных данных по влиянию добавок щелочных оксидов на кристаллизацию кварцевого стекла [3, с. 106]. Согласно данным рентгенофазового анализа высокодисперсного порошка, полученного измельчением образца (см. рис. 3), он при преимущественном содержании кристобалита включает около 10 % тридимита.

28

Из данных, приведенных в статье [2] (см. рис. 1, кривая 2), следует, что до 200 °С тридимит характеризуется существенно большим расширением, чем кристобалит (кривая 1). Этим можно объяснить тот факт, что показатели роста образцов при 200 °С после термообработки однократной при 1500 °С [2, рис. 5, *д*] и двукратной (см. рис. 1) существенно различаются: в первом случае рост составляет 0,43 %, во втором 0,68 %, т. е. разница 58 %. У тридимита при этой температуре расширение составляет 0,8 %, т. е. только на 17 % больше, чем у образца, рассматриваемого на рис. 1.

С точки зрения термостойкости материал с сочетанием кристобалита и тридимита обладает большей устойчивостью к колебаниям температуры [2, 9]. Это обусловлено прежде всего тем, что в отличие от кристобалита тридимит характеризуется более пологой температурной зависимостью расширения [2, см. рис. 1]. Следует учитывать и тот факт, что в интервале 700–1200 °C аналогично α-кристобалиту расширение тридимита сопоставимо с расширением плавленого кварца и не превышает 0,05 %. Общий показатель расширения тридимита при 1200 °C составляет 1,2 % [9, с. 23], что существенно ниже, чем у кристобалита.

По аналогии с рассмотренными данными проведены подобные исследования применительно к кристаллизационной способности монолитного плавленого кварца. Если изученные образцы кварцевой керамики [1, 2, 10] характеризуют способность к кристобалитизации матричной системы керамобетонов, то более чистый по химическому составу [3, 11] плавленый кварц по своей кристаллизационной способности характеризует поведение огнеупорного заполнителя в кварцевых сталеразливочных огнеупорах [4, 6, 12]. На рис. 4 показано влияние температуры изотермического нагрева до 1500 °С на изменение линейных размеров как исходного образца монолитного плавленого кварца (кривая 1), так и того же образца, предварительно термообработанного при 1500 °С, в процессе вторичного нагрева (кривая 2). Содержание оксидов в исходном материале, %: SiO₂ 99,4, Al₂O₃ 0,41, Fe₂O₃ 0,02, TiO₂ 0,02, CaO и MgO — по 0,01 %, углерод 0,1 %.

Как отмечено в статье [11], использованный в настоящей работе плавленый кварц или непрозрачное кварцевое стекло по сравнению с прозрачным отличается высоким содержанием рассеивающих свет газовых микропузырей диаметром от 3 до 300 мкм [11, 13]. Этим обусловлена существенно меньшая плотность непрозрачного кварцевого стекла (2,02–2,08 г/см³) [13]. Преимущественно закрытая пористость в непрозрачном кварцевом стекле может достигать 5–8 %, т. е. объемная доля газовых микропузырей в непрозрачном кварцевом стекле весьма



Рис. 4. Температурная зависимость относительного теплового расширения и усадки образца плавленого кварца после первичного (1) и вторичного (2) нагрева до 1500 °C со скоростью 5 °C/мин

значительна. Как следует из приведенных ниже данных, последний фактор существенно влияет на кристаллизационную способность кварцевого стекла.

В предыдущей статье [8] настоящей серии публикаций было показано, что в процессе однократного неизотермического нагрева образца плавленого кварца до 1500 °С со скоростью нагрева 5 °С/мин отмечалась только его поверхностная кристобалитизация, а отмеченное уменьшение размеров (1,02 %) связано с вязкостными свойствами плавленого кварца. Из рис. 4 следует, что заметное уменьшение размеров образца плавленого кварца обнаруживается при 1200 °С (~0,05 %, см. кривую 1). В интервале 1300-1400 °С относительное уменьшение образца составляет 0,48 %, в интервале 1400-1500 °C оно возрастает до 0,65 %. Это свидетельствует о предположительном влиянии фактора вязкости на деформацию материала [3, 10, 13]. С учетом присутствия в исходном материале микропор вполне вероятно, что определенная доля общей усадки образца определяется не только его вязкостью, но и уменьшением объема закрытых пор. Этот вопрос нуждается в дополнительном исследовании. Как следует из характера кривой 2 рис. 4, поведение образца при повторном и первичном нагреве кардинально различается (кривая 1). Из сопоставления кривых 1 и 2 следует, что при нагреве как при 1300, так и при 1500 °C отмечается 4-кратное уменьшение усадки образца.

Это обусловлено тем, что образец плавленого кварца по своему объему после первичного изотермического нагрева уже находится в предкристобалитном состоянии, которое вследствие этого характеризуется повышенной вязкостью по сравнению с исходным материалом [3]. В образцах, подвергнутых двукратной термообработке, уже отмечается не только повышенная поверхностная кристобалитизация, но и частично объемная — на поверхности раздела газовых микропузырей. По данным рентгенофазового анализа порошка, полученного измельчением образца после его двукратной термообработки, содержание в нем кристобалита составило около 8 %, а кварца 0,2 %. Согласно данным [13, с. 92] показатели вязкости термообработанного при 1000 °С кварцевого стекла с содержанием 2, 9, 12 % кристобалита по сравнению с исходным выше в 1,75, 6,7, 8,5 раза соответственно. Поэтому вполне объяснима отмеченная на рис. 4 разница хода кривых относительной усадки образцов, определяемой преимущественно вязкостью материала. Из сопоставления данных по содержанию кристобалита в образце плавленого кварца после его двукратной термообработки до 1500 °C (8 %) и образца кварцевой керамики, содержащей 32-34 % кристобалита [2], без щелочной добавки после однократного нагрева до той же температуры очевидна существенная разница в кинетике кристобалитизации сравниваемых материалов. Эта разница обусловлена как различным содержанием примесей, так и поверхностью раздела фаз сопоставляемых материалов.

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ КРИСТОБАЛИТА НА СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

Ранее [12] было показано, что даже при незначительном повышении температуры обжига (например, от 1150 до 1200 °С) прочность материалов резко возрастает (σ_{cm} от 70 до 130 МПа). Это дает основание предположить, что уже на первых стадиях службы кварцевых огнеупоров их прочностные показатели резко возрастают по сравнению с исходными; повышается эрози-



Рис. 5. Сталеразливочный стакан до службы (*a*) и после службы (*б*): 1 — верхняя часть без значительного содержания кристобалита; 2 — нижняя часть (разрушаемая при охлаждении) с преимущественным содержанием кристобалита

онная стойкость огнеупоров этого класса. При этом следует учитывать, что в отличие от других видов оксидной керамики прочность при изгибе кварцевой керамики с ростом температуры до 1100–1150 °С значительно увеличивается [3, 4].

Отличительная особенность кварцевых сталеразливочных огнеупоров состоит в различной степени их кристобалитизации по высоте и объему в процессе эксплуатации. Вследствие этого после окончания службы нижняя часть сталеразливочных стаканов или труб, которая находилась в контакте с металлом, в процессе охлаждения разрушается и отделяется от верхней части. Этот эффект обусловлен созданием в отработанном изделии критических термических напряжений за счет значительного (5,0-5,5 %) изменения объема закристобалитизированного в процессе службы материала в относительно узком интервале температур при охлаждении за счет перехода высокотемпературной формы кристобалита в низкотемпературную (рис. 5).

В отличие от крупногабаритных изделий опытные образцы-балочки размерами 10 × 10 × × 50 мм с высоким содержанием кристобалита несмотря на значительную деструкцию сохраняли целостность не только в процессе охлаждения после неизотермического нагрева до 1500 °C, но и при повторном нагреве до 1000 °C с повышенной (25 °С/мин) скоростью нагрева. Для изучения влияния степени кристобалитизации кварцевой керамики на некоторые ее свойства были изучены кажущаяся плотность ркаж, открытая пористость Потк, а также пределы прочности при изгибе $\sigma_{\rm изг}$ и сжатии $\sigma_{\rm cж}$ образцов с различным содержанием щелочной добавки после их неизотермического нагрева до 1500 °C с последующим охлаждением, повторным нагревом до 1000 °C и охлаждением. Таким образом, при этих режимах осуществлялось трехкратное модификационное превращение кристобалита: α→β — превращение при охлаждении после нагрева до 1500 °C, β→α — при нагреве до 1000 °C, α→β — при последующем охлаждении. Все образцы после первичной и вторичной термообработки сохраняли свою целостность, и при этом видимых наружных дефектов на них не отмечалось. На рис. 6 показаны зависимости показателей окаж, Потк и оказ образцов от содержания в них добавки силикат-глыбы, а соответственно, и содержания кристобалита. Показатели ркаж максимальны (2,15 г/см³) у образцов исходного состава и минимальны (2,03 г/см³) у образцов с максимальным содержанием добавки силикат-глыбы. В такой же закономерности находятся и показатели Потк: минимальное ее значение (5.7 %) у образца исходного состава, максимальное (9,7 %) у образца с максимальным содержанием добавки. Однако максимальным значением σ_{изг} характеризуется образец с содержанием добавки 2 %, т. е. имеющий повышенную пористость.

30

Из рис. 6 следует, что резкое изменение всех ркаж, показателей образцов наблюдается в области незначительного (до 0,25 %) содержания в них щелочной добавки. Между тем если анализировать зависимости тех же показателей от содержания в образцах кристобалита, то аналогичные кривые оказываются более пологими (рис. 7). Это обусловлено тем, что присутствие даже 0,1 и 0,25 % добавки силикат-глыбы сопровождается увеличением содержания кристобалита в образцах до 48 и 76 % при 33 % в исходном [1]. Существенное увеличение содержания добавки до 1 и 2 % приводит к росту количества кристобалита до 88 и 96 % соответственно. Таким образом, из рис. 6 и 7 следует, что свойства материалов определяются преимущественно их фазовым составом или содержанием кристобалита.

Как отмечено в статье [1], как исходные образцы, так и образцы с различным содержанием добавок в исходном (после сушки) состоянии характеризовались близкими значениями Потк (11-12 %) и р_{каж} (1,92-1,95 г/см³). Как следует из рис. 6, 7, максимальные значения $\rho_{\text{каж}}$ и минимальные Потк отмечаются у образца без добавки. Это обусловлено тем, что (как это следует из рис. 1, а статьи [1]) в процессе неизотермического нагрева до 1400 °С линейная усадка этого образца составляет 2,06 %, что соответствует уменьшению его исходной пористости примерно на 6,2 %. Дальнейший нагрев образца сопровождается частичной (33 %) кристобалитизацией материала, который при охлаждении уменьшается в объеме примерно на 5 % [3, 8], что сопровождается некоторым ростом пористости образца. С учетом усадки при нагреве, сопровождающейся некоторым ростом пористости образца до 4,5-4,8 % и последующим уменьшением объема за счет полиморфного превращения закристобалитизированного материала, $\Pi_{\text{отк}}$ составляет 5,7-6,0 %, что следует из рис. 6.

У образцов с добавками 0,1 и 0,25 % силикатглыбы усадка перед началом кристобалитизации составляет 2,1 и 2,6 % соответственно (см. рис. 1, б, в в статье [1]). Несмотря на то что при этом достигается уменьшение пористости в пределах 6,0–7,5 %, ее дополнительный рост за счет перехода высокотемпературного кристобалита в низкотемпературный становится существенно большим из-за того, что его содержание в материале значительно увеличивается (до 48 и 76 % при добавке 0,1 и 0,25 % соответственно). По этой причине $\Pi_{\text{отк}}$ этих составов составляет 6,2 и 7,4 % соответственно.

Характерной особенностью образцов с повышенным (1 и 2 %) содержанием добавки является низкая степень их спекания (усадки) перед началом кристобалитизации (0,45 и 0,2 % у образцов с добавками 1 и 2 % соответственно, см. рис. 1, б, в в статье [1]). Кроме того, для этих материалов в отличие от предыдущих



Рис. 6. Влияние содержания добавки силикат-глыбы на $\rho_{\text{каж}}$ (1), $\Pi_{\text{отк}}$ (2) и $\sigma_{\text{изг}}$ (3) образцов после однократного неизотермического нагрева до 1500 °C при скорости 5 °С/мин

весьма существенны фактор спекания с преимущественным содержанием кристобалита и, соответственно, рост пористости вследствие полиморфного превращения кристобалита, содержание которого у образцов с добавками 1 и 2 % составляет 88 и 96 %. Вследствие этого их $\Pi_{\text{отк}}$ достигает соответственно 9,2 и 9,7 %, а $\rho_{\text{каж}}$ 2,05 и 2,03 г/см³. Если исходить из предположения, что в образцах отсутствует закрытая пористость, то при отмеченных значениях $\Pi_{\text{отк}}$ и $\rho_{\text{каж}}$ истинная плотность образцов с 1 и 2 % добавки должна составлять 2,25-2,26 г/см³. Между тем с учетом преимущественного содержания в этих материалах кристобалита, характеризующегося истинной плотностью 2,30-2,32 г/см³ [2], истинная плотность образцов должна быть несколько выше (2,28-2,29 г/см³), что свидетельствует о присутствии в них небольшого объема (1-2%) закрытых пор.

В предшествующих статьях [10, 12, 14] настоящей серии публикаций было показано, что даже незначительное содержание кристобалита в кварцевых огнеупорах после их обжига сопровождается заметным уменьшением прочности. Так, по данным [10, рис. 2], при повышении тем-







Рис. 8. Влияние содержания добавки силикат-глыбы на о_{сж} образцов после однократного неизотермического нагрева до 1500 °С при скорости 5 °С/мин

пературы обжига от 1200 до 1300 °С вследствие частичной кристобалитизации $\sigma_{\rm изг}$ образцов двух составов уменьшался от 38 и 28 до 16 и 13 МПа соответственно, т. е. более чем в 2 раза. В рассматриваемом аспекте образцы всех изученных составов (см. рис. 6 и 7) несмотря на достаточно низкие значения Потк характеризуются существенно меньшим о_{изг} из-за значительно большего или преобладающего содержания в них кристобалита, вызывающего деструкцию материала вследствие резкого изменения объема в достаточно узком интервале температур охлаждения [3, 9]. Характерно, что максимальным значением $\sigma_{\rm изг}$ (7,5 МПа) характеризуется материал с максимальной (2%) добавкой, содержащий около 96 % кристаллической фазы.

Кажущийся аномальным, этот результат обусловлен следующим. Как следует из рис. 1, *д* в статье [1], для образца с добавкой 2 % силикатглыбы характерно спекание уже закристобалитизированного материала. Значительная кристобалитизация этого образца протекает в интервале 900-1200 °C. В интервале 1000-1500 °C усадка кристобалитсодержащего материала составляет около 1,2 %, что соответствует уменьшению его пористости на 3,6 %.

На образцах-обломках (сечением 10 × 10 мм) после испытания $\sigma_{\rm изг}$ исследовали их $\sigma_{\rm сж}$. Установлено, что в отличие от низкого уровня показателей $\sigma_{\rm изг}$ образцов со значительным или преимущественным содержанием кристобалита показатели $\sigma_{\rm сж}$ характеризуются существенно меньшим падением, чем у ранее изученных образцов [10]. Как следует из рис. 8, показатели $\sigma_{\rm сж}$ по сравнению с $\sigma_{\rm изг}$ (см. рис. 6, 7) исключительно высоки и в зависимости от содержания добавки колеблются в пределах 130–185 МПа. При этом максимальные и минимальные значения $\sigma_{\rm сж}$ соответствуют образцам, содержащим 0,1 и 1 % добавки соответственно.

Ранее [10] при изучении влияния температуры обжига на спекание и кристобалитизацию образцов было установлено, что максимальные значения оизг соответствуют температурам обжига 1230 и 1250 °С; при 1300 и 1350 °С значения $\sigma_{\rm изг}$ образцов резко снижаются. В отличие от этого максимальные значения осж образцов соответствуют температуре обжига 1300 °C. В результате этих исследований сделан вывод о том, что дефектность материалов, содержащих кристобалит, в большей мере проявляется на показателях оизг. При испытаниях кристобалитсодержащих образцов на сжатие их дефектность (микротрещины, разрыв сплошности) менее выражена, чем на изгиб. Поэтому если соотношение σ_{сж}/σ_{изг} у образцов без кристобалита, обожженных при 1230-1250 °C, составляет 5-7, то после 1300 °C (у образцов с кристобалитом) это соотношение достигает 9-10 [10].

Из сопоставления показателей σ_{cm} и σ_{usr} (см. рис. 6–8) следует, что в данном случае соотношение σ_{cm}/σ_{usr} существенно выше и в зависимости от содержания добавки находится в интервале 35–40. Отсюда следует, что для материалов с повышенным содержанием кристобалита структурный фактор, отмеченный в статье [10], играет значительно большую роль. Из сопоставления максимальных значений σ_{cm} и σ_{usr} по данным [10] и результатам настоящей статьи следует, что в материалах с преимущественным содержанием кристобалита при аналогичных значениях пористости показатели σ_{usr} ниже в 5,5 раза, а σ_{cm} только в 1,5 раза.

Таким образом, изучено влияние повторного неизотермического нагрева до 1500 °С на усадку и кристобалитизацию образцов, содержащих 0,5 % Na₂O, и исходного плавленого кварца. У образца с шелочной добавкой повторная термообработка сопровождается не только преимущественной кристобалитизацией материала, но и образованием определенного (до 10 %) содержания тридимита. После повторного нагрева исходного плавленого кварца содержание кристобалита составляет около 10 %. На образцах с различным содержанием добавки после их однократного неизотермического нагрева до 1500 °С изучены их ркаж, Потк, онаг и осж; показатели Потк образцов в зависимости от их состава находятся в пределах 5,5–9,5 %, $\sigma_{\rm cm}$ — в пределах 130-185 МПа.

(Продолжение следует)

Библиографический список

1. *Пивинский, Ю. Е.* Исследования в области получения материалов на основе ВКВС плавленого кварца. Часть 8. Влияние щелочных добавок на спекание и кристобалитизацию керамики в режиме неизотермического нагрева / Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин, А. Ю. Колобов // Новые огнеупоры. — 2016. — № 1. — С. 22–28. 2. *Пивинский, Ю. Е.* Исследования в области получения материалов на основе ВКВС плавленого кварца. Часть 9. Влияние щелочных добавок на кристобалитизацию и тепловое расширение материалов после неизотермического нагрева / Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин, А. Ю. Колобов // Новые огнеупоры. — 2016. — № 3. — С. 123–128.

3. *Пивинский, Ю. Е.* Кварцевая керамика и огнеупоры. Т. І. Теоретические основы и технологические процессы / Ю. Е. Пивинский, Е. И. Суздальцев; под ред. Ю. Е. Пивинского. — М. : Теплоэнергетик, 2008. — 672 с.

4. *Пивинский, Ю. Е.* Кварцевая керамика и огнеупоры. Т. II. Материалы, их свойства и области применения / *Ю. Е. Пивинский, Е. И. Суздальцев*; под ред. Ю. Е. Пивинского. — М.: Теплоэнергетик, 2008. — 464 с.

5. **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, $N_{\rm P} 3$. -P. 245-253.

6. *Пивинский, Ю. Е.* Исследования в области получения материалов на основе ВКВС плавленого кварца. Часть 2. Кварцевые сталеразливочные огнеупоры / *Ю. Е. Пивинский* // Новые огнеупоры. — 2015. — № 1. — С. 17–23.

Pivinskii, Yu. E. Research in the area of preparing materials based on fuzed quartz HCBS. Part 2. Guvartz steel — pouring refractories / *Yu. E. Pivinskii* // Refractories and Industrial Ceramics. — 2015. — Vol. 56, № 1. — P. 20–25.

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

8. **Пивинский, Ю. Е.** Реология дисперсных систем, ВКВС и керамобетоны. Элементы нанотехнологий в силикатном материаловедении : избр. тр. Т. 3 / Ю. Е. Пивинский. — СПб. : Политехника, 2012. — 682 с.

9. *Кайнарский, И. С.* Динас / *И. С. Кайнарский.* — М. : Гос. изд-во по черн. и цв. металлургии, 1961. — 470 с.

10. **Пивинский, Ю. Е.** Исследования в области получения материалов на основе ВКВС плавленого 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 cristobalitization / *Yu. E. Pivinskii, P. V. Dyakin //* Refractories and Industrial Ceramics. — 2015. — Vol. 56, № 4. — P. 366–373.

11. **Пивинский, Ю. Е.** Исследования в области получения материалов на основе ВКВС плавленого 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 fuzed quartz HCBS. Part 4. Study of isothermal and nonisotermal sintering kinetics / Yu. E. Pivinskii, P. V. Dyakin // Refractories and Industrial Ceramics. -2015. -Vol. 56, N = 2. -P. 172-179.

12. **Пивинский, Ю. Е.** Исследования в области получения материалов на основе ВКВС плавленого кварца. Часть З. Изучение и совершенствование процесса центробежного формования / Ю. Е. Пивинский // Новые огнеупоры. — 2015. — № 3. — С. 79–90.

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

13. Ботвинкин, О. К. Кварцевое стекло / О. К. Ботвинкин, А. И. Запорожский. — М. : Стройиздат, 1965. — 260 с.

14. **Пивинский, Ю. Е.** Исследования в области получения материалов на основе ВКВС плавленого 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 fuzed quartz HCBS. Part 1. Comparative evaluation and distinguishing features of quarts ceramic and refractory technology / Yu. E. Pivinskii, P. V. Dyakin // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 55, № 4. — P. 311–317.

Получено 29.01.16 © Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин, А. Ю. Колобов, 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