

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 ПЛАВЛЕННОГО КВАРЦА. Часть 9. Влияние щелочных добавок на кристобалитизацию и тепловое расширение материалов после неизотермического нагрева*

Изучено влияние щелочесодержащей добавки водорастворимой силикат-глыбы на степень кристобалитизации и тепловое расширение образцов на основе ВКВС плавленного кварца. Содержание добавки (по Na_2O) изменяли в пределах 0,1–2,0 % или от 0,025 до 0,50 %. В образцах, подвергнутых предварительно неизотермическому нагреву до 1500 °С, содержание кристобалита составляло от 32–34 % (образцы без добавки) до 88 и 96 % (образцы с 1 и 2 % добавки). Максимальное тепловое расширение образцов, соответствующее переходу низкотемпературного кристобалита в высокотемпературный, происходило в ограниченном интервале 150–300 °С.

Ключевые слова: плавленный кварц, кристобалит низко- и высокотемпературный, силикат-глыба, тепловое расширение, неизотермический нагрев, кварцевые сталеразливочные огнеупоры.

Известно, что кристобалит из всех существующих модификаций кремнезема является наиболее огнеупорным и химически стойким [1, 2]. В кварцевых сталеразливочных огнеупорах превращение аморфного плавленного кварца в кристобалит осуществляется непосредственно в процессе их высокотемпературной эксплуатации [2–6]. В предыдущей статье настоящей серии [2] был изучен процесс спекания и кристобалитизации образцов как исходных, так и с щелочесодержащими добавками в процессе их высокотемпературного изотермического нагрева. В настоящей статье поставлена задача изучения влияния щелочесодержащих добавок на фазовый состав и тепловое расширение образцов, подвергнутых предварительной термообработке в режиме неизотермического нагрева до 1500 °С.

О НЕКОТОРЫХ АСПЕКТАХ ПРОЦЕССА КРИСТОБАЛИТИЗАЦИИ

В отличие от классической диаграммы кремнезема по Феннеру было многократно показано, что на диаграмме состояния чистого кремне-

зема (без существенных примесей) образования тридимита как самостоятельной фазы не происходит [2–5]. Как для высокочистого прозрачного, так и для непрозрачного кварцевого стекла с умеренным содержанием примесей при повышенных температурах характерно образование кристобалита [1–4]. Это объясняется тем, что кварцевое стекло (плавленный кварц) характеризуется кристобалитоподобной структурой и поэтому для образования зародышей кристобалита требуется наименее существенная перестройка его структуры [2, с. 97].

С точки зрения эксплуатационной стойкости кварцевых огнеупоров фактор повышенной скорости кристобалитизации матричной системы, по всей видимости, играет положительную роль. Как отмечено ранее [1, 2, 5, 6], кристобалит по сравнению с другими материалами SiO_2 характеризуется максимальными огнеупорностью и химической стойкостью. Поэтому в процессе высокотемпературной разливки стали желательна ускоренная кристобалитизация матричной системы, определяющей, как правило, стойкость в службе керамобетонных кварцевых огнеупоров [6–8]. Между тем образующийся при высоких температурах службы высокотемпературный α -кристобалит при охлаждении ниже 300 °С превращается в низкотемпературный β -кристобалит [1, 3–5]. Этот процесс сопровождается существенным изменением плотности, а соответственно, и резким ростом теплового расширения в весьма узком

* Часть 1 статьи опубликована в № 7 за 2014 г., части 2–7 в № 1, 3, 4, 6, 7 и 9 за 2015 г., часть 8 в № 1 за 2016 г.



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

интервале температур (рис. 1). Вследствие этого кристобалитсодержащие огнеупоры характеризуются пониженной термостойкостью [2, 7, 8].

По данным [1–4, 9–12], плотность высокотемпературного α -кристобалита находится в пределах 2,21–2,23 г/см³, а низкотемпературного β -кристобалита — в пределах 2,32–2,34 г/см³, поэтому фазовый переход $\alpha \rightleftharpoons \beta$ -кристобалит в широком интервале температур сопровождается изменением объема в пределах 5–6 %. При этом скачкообразный рост (см. рис. 1) наблюдается в относительно узком интервале (180–275 °С). Температура $\alpha \rightarrow \beta$ -перехода кристобалита существенно зависит как от степени его совершен-

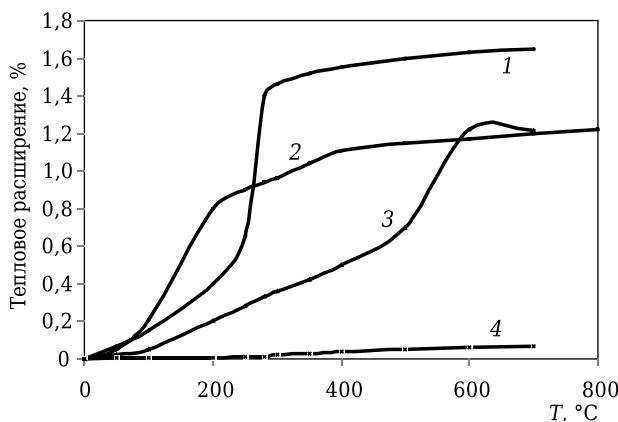


Рис. 1. Температурная зависимость теплового расширения кристобалита (1), тридимита (2), кварца (3) и кварцевого стекла или кварцевой керамики, не содержащей кристобалита (4)

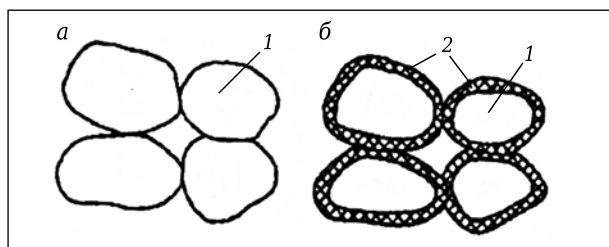


Рис. 2. Схема возникновения кристаллов кристобалита в кварцевой керамике до (а) и после обжига (б): 1 — исходное стекло; 2 — слой кристобалита

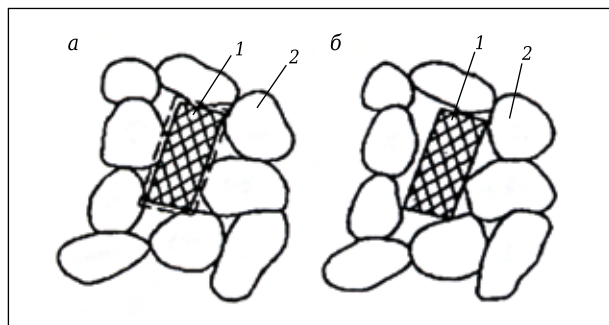


Рис. 3. Схема появления микрозазоров на контакте кристобалит – стекло до термообработки, в ее процессе (- -) (а), после термообработки и остывания (б): 1 — кристобалит; 2 — стекло

ства или температуры и продолжительности образования, так и от температуры материала [2, 4, 11, 13–15]. В предыдущей статье [15] было показано, что в огнеупоре центробежного формования со значительным содержанием зернистого заполнителя при общем содержании кристобалита до 15 % его максимальное тепловое расширение соответствует температуре 200 °С. Из рис. 1 видно, что тепловое расширение кристобалита (кривая 1) при 500 °С по сравнению с тридимитом (кривая 2), кварцем (кривая 3) и кварцевым стеклом (кривая 4) выше в 1,5, 2,2 и 65 раз соответственно.

На кинетику процесса кристобалитизации кварцевой керамики и огнеупоров существенно влияет фактор поверхности раздела фаз. С учетом того, что кристобалитизация начинается на поверхности (рис. 2), большое значение имеют дисперсность и зерновое распределение частиц в исходном материале. Между тем ранее [9, 16, 17] была обнаружена и изучена иная разновидность кристобалита по сравнению с возникающей в процессе обжига или высокотемпературной службы огнеупоров (см. рис. 2). Речь идет о включениях или примесях кристобалита или плавленного кварца в «предкристобалитном» состоянии, вносимых в состав исходного сырья. Последние могут вноситься при этом вследствие недостаточной очистки наплавленного блока плавленного кварца или использования в виде добавок при помоле брака обожженных изделий, находящихся в предкристобалитном состоянии. По сравнению с кристобалитом, образующимся по схеме рис. 2, кристобалит, вносимый в исходный состав в виде примесей, имеет существенное отличие в процессе термообработки (рис. 3).

Как следует из рис. 2, кристобалит, образовавшийся в процессе обжига, возникает как фаза, кристаллизующаяся на поверхности зерен, и представляет собой единое целое с частицами стекла. В этом случае расширение кристобалита вносит практически аддитивный вклад в эффективное расширение материала. При последующих нагревах связь между частицами кристобалита и стекла частично разрушается, что приводит к гистерезису линейного расширения [16, 17]. Однако сцепление в основном остается прочным, и характер кривой при многократных нагревах воспроизводится.

Принципиально иным образом влияют на линейное расширение частицы кристобалита, вносимого в керамику совместно с сырьем. Для исходного материала до термообработки характерен плотный контакт между частицами плавленного кварца и включениями кристобалита (см. рис. 3, а). В процессе термообработки (при первичном нагреве) полуфабриката, содержащего включения кристобалита, вокруг изолированной кристаллической частицы материал спекается. При последующем охлаждении из-за су-

ществленного уменьшения объема (5–6 %) при переходе $\alpha \rightarrow \beta$ -кристобалит (что в десятки раз меньше аналогичного изменения объема кварцевого стекла) между кристаллической частицей и матрицей образуется микрозазор или разрыв на границе стекло – кристобалит (см. рис. 3, б).

Кристобалит в кварцевых огнеупорах из плавленного кварца, содержащего включения кристобалита в исходном материале, был классифицирован как «первичный», а кристобалит, образующийся при обжиге, — как «вторичный» [2].

Характер теплового расширения исходного материала, содержащего включения кристобалита, следует из рис. 4. В интервале 150–600 °C ΔL образца составляет около 0,15 %. Однако при охлаждении размер образца оказывается неизменным, т. е. в процессе термообработки при 900–1000 °C у материалов, содержащих кристобалит, проявляется рост. При последующем повторном нагреве (после охлаждения) фазовый переход $\beta \rightleftharpoons \alpha$ -кристобалит исчезает, что объясняется «эффектом ореха» [2, 16, 17] (см. рис. 3).

Как показала практика производства кварцевых огнеупоров [2, 7], опасность присутствия в исходном плавленном кварце включений первичного кристобалита состоит не только в том, что в процессе первичного нагрева (на начальной стадии обжига) возможно образование трещин в изделиях, но и в том, что при этом значительно (на 50–100 °C) снижается температура образования вторичного кристобалита [2, с. 559]. В частности, в предыдущей статье серии [14, см. рис. 7] показано, что для образцов на основе ВКВС плавленного кварца, содержащего кристаллические включения SiO_2 , уже при достижении температуры обжига 1200 °C характерно образование кристобалита, что сопровождается прекращением процесса спекания.

Установлено [5, с. 354], что в процессе эксплуатации кварцевых сталеразливочных огнеупоров протекают два различных процесса — спекание

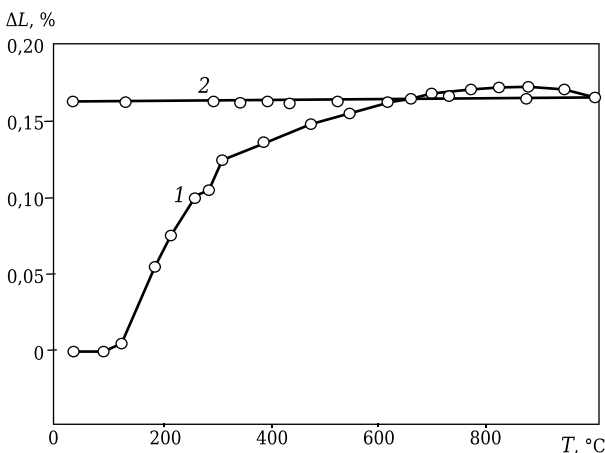


Рис. 4. Температурная зависимость относительного линейного удлинения ΔL отливки на основе плавленного кварца, содержащего 5–7 % кристобалита, при первичном нагреве (1) и охлаждении (2)

и переход материала в кристобалит. Последний вследствие высокой огнеупорности (~1730 °C) даже при температурах разливки стали спекается плохо. Кристобалитизация изделий зависит от зоны их контакта с металлом. В процессе исследований погружаемых кварцевых стаканов после службы было установлено, что в зоне контакта с металлом 100 %-ный переход материала в кристобалит происходит через 1–2 ч эксплуатации [7, с. 351]. Пористость при этом уменьшается на 40–50 % по сравнению с исходной.

О ВЛИЯНИИ ДОБАВОК НА СТЕПЕНЬ КРИСТОБАЛИТИЗАЦИИ ОБРАЗЦОВ И ИХ ТЕПЛОЕ РАСШИРЕНИЕ

В предыдущей статье серии [2] с помощью высокотемпературного dilatометра было изучено влияние щелочесодержащих добавок водорастворимого порошка силикат-глыбы на относительное изменение размеров образцов в процессе их неизотермического нагрева до 1500 °C со скоростью подъема температуры 5 °C/мин. Добавку силикат-глыбы вводили в виде сухомолотого полидисперсного порошка ($d_{\max} \leq 100$ мкм). Без учета примесей содержание SiO_2 и Na_2O в нем составляло 75 и 25 %. При введении добавки в количестве 0,1, 0,25, 1,0 и 2,0 % содержание вводимой при этом в состав материала щелочи (Na_2O) составляло 0,025, 0,062, 0,25 и 0,50 % соответственно. В зависимости от содержания добавки установлено существенное различие температур как начальной стадии спекания (усадки), так и кристобалитизации (прекращение усадки). В частности, было установлено, что у образцов как без добавки, так и с содержанием силикат-глыбы 0,1, 0,25, 1,0 и 2,0 % начало интенсивной кристобалитизации отмечалось при температурах изотермического нагрева до 1400, 1350, 1300, 1100 и 1000 °C соответственно [2]. В соответствии с этими данными, как показано в настоящей статье, в изученных образцах отмечено существенное различие как в тепловом расширении, так и в содержании кристобалита.

На рис. 5, а показаны данные, характеризующие температурную зависимость относительного теплового расширения исходного образца кварцевой керамики, который был подвергнут предварительному обжигу посредством неизотермического нагрева в dilatометре со скоростью 5 °C/мин. Аналогичные данные для образцов с разным содержанием силикат-глыбы показаны на рис. 5, б–д. При этом во всех опытах скорость нагрева образцов в изученном интервале (20–1000 °C) составляла 25 °C/мин.

Как следует из рис. 5, а–д, у образцов всех составов отмечается подобный характер теплового расширения. В интервале 150–300 °C отмечается существенный рост их размеров, свидетельствующий о значительном содержании

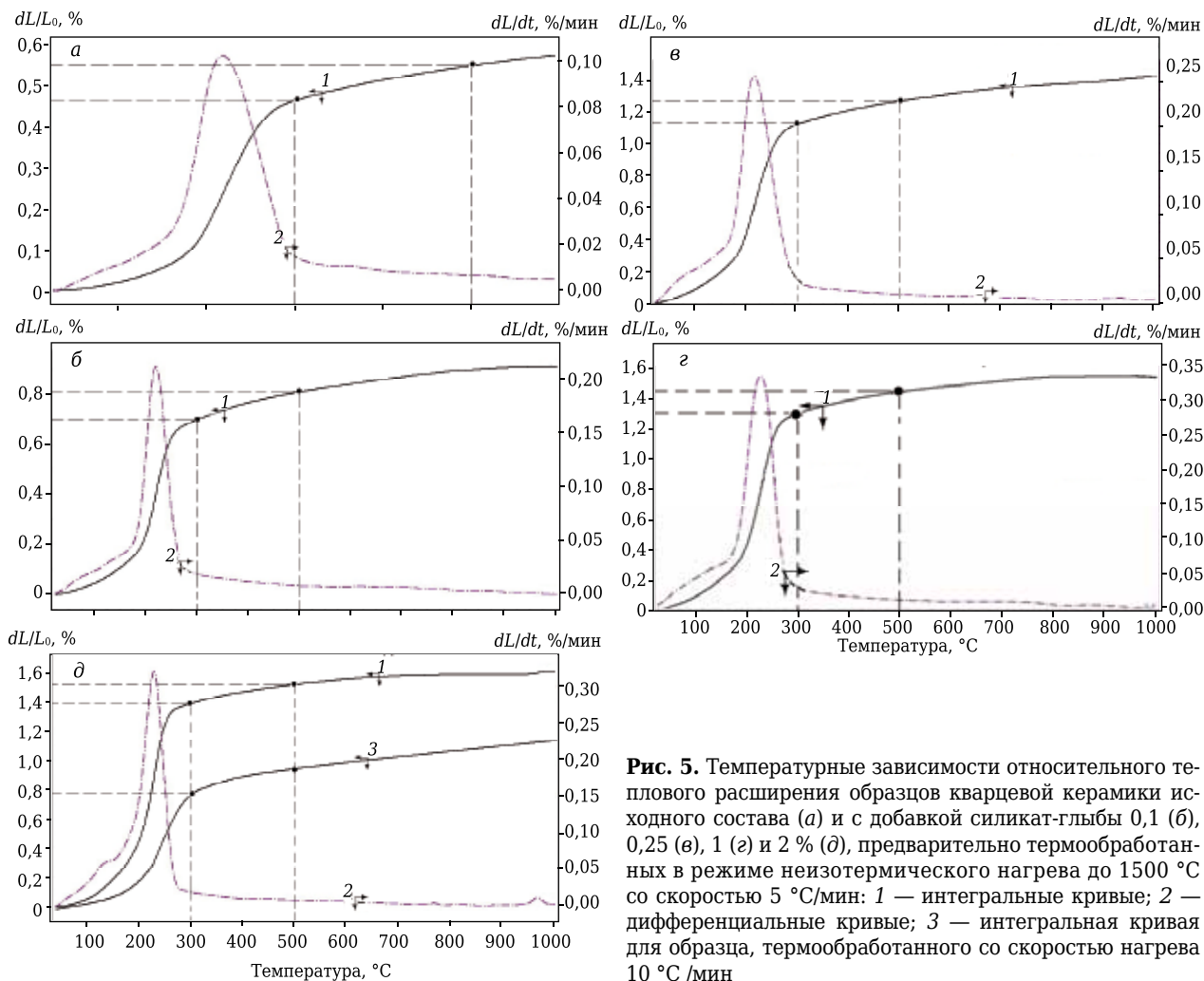


Рис. 5. Температурные зависимости относительного теплового расширения образцов кварцевой керамики исходного состава (а) и с добавкой силикат-глибы 0,1 (б), 0,25 (в), 1 (г) и 2 % (д), предварительно термообработанных в режиме неизотермического нагрева до 1500 °С со скоростью 5 °С/мин: 1 — интегральные кривые; 2 — дифференциальные кривые; 3 — интегральная кривая для образца, термообработанного со скоростью нагрева 10 °С/мин

в образцах кристобалита. При этом показатель dL/L_0 образцов повышается по мере увеличения содержания в них добавки силикат-глибы. Для интервала 300–500 °С характерно менее значительное расширение образцов. При повышении температуры до 500–1000 °С показатели dL/L_0 существенно уменьшаются, а выше 1000 °С — постепенно приближаются к аналогичным значениям для плавящего кварца или керамики, не содержащей кристобалита.

Для ориентировочной оценки объемного содержания кристобалита в образцах использован интерполяционный метод [15]. Он основан на сопоставлении относительного роста за счет кристобалитового $\beta \rightarrow \alpha$ -перехода (см. рис. 5) с аналогичными значениями для эталонного кристобалита (см. рис. 1, кривая 1). При этом сопоставлены значения относительного роста образцов (см. рис. 5) при двух температурах — 300 и 500 °С. Как следует из рис. 1, кривая 1, у образца кристобалита эти значения составляют 1,48 и 1,60 % соответственно.

Из рис. 5, кривая 1, следует, что у исходного образца существенный рост, обусловленный пе-

реходом низкотемпературного β -кристобалита в высокотемпературный α -кристобалит, начинается при температуре около 150 °С и резко возрастает в интервале 200–270 °С. Судя по дифференциальной кривой, максимальное тепловое расширение образца достигается при 220 °С. При температуре нагрева 300 °С относительный рост образца достигает 0,47 %, а при 500 °С 0,55 %. Сопоставление этих данных с данными для эталонного кристобалита показывает, что ориентировочное содержание кристобалита в образце исходного состава находится в пределах 32–34 %.

Установлено, что даже незначительные добавки силикат-глибы (0,1 и 0,25 %), как следует из рис. 5, б и в, вызывают существенный рост содержания кристобалита в образцах. Так, у образца с минимальным содержанием добавки (0,1 %) dL/L_0 при 300 и 500 °С составляет 0,7 и 0,8 % соответственно. Еще более значительный рост проявляет образец с добавкой 0,25 % силикат-глибы (см. рис. 5, в). Соответствующие значения роста при этом достигают 1,11 и 1,26 % при 300 и 500 °С соответственно. Судя по дифференциальной кривой рис. 5, б, в пиковые (максимальные) значения

теплового расширения образцов с содержанием добавки как 0,1 %, так и 0,25 % соответствуют температуре 220 °С. Характерно, что независимо от содержания добавки показатели dL/L_0 образцов в интервале 500–1000 °С примерно одинаковы и составляют 0,135 %. Ориентировочные значения содержания кристобалита в образцах с добавками силикат-глыбы 0,1 и 0,25 % составляют 47–50 и 75–78 % соответственно, т. е. существенно выше, чем у исходного образца.

Из рис. 5, г следует, что в образцах с добавками 1 и 2 % силикат-глыбы отмечаются существенно большие значения показателей роста, чем у остальных (см. рис. 5, а, б). Так, у образца с добавкой силикат-глыбы 1 % показатели dL/L_0 при 300 и 500 °С составляют 1,30 и 1,41 % соответственно. Максимальные показатели dL/L_0 (1,40 и 1,52 % при 300 и 500 °С) отмечаются у образца с максимальным содержанием добавки (2 %). Как следует из дифференциальных кривых рис. 5, г, д, максимальная интенсивность роста образцов соответствует температуре 220 °С. Из сопоставления показателей dL/L_0 этих образцов и кристобалита (см. рис. 1) следует, что ориентировочное его содержание в образцах с добавками силикат-глыбы 1 и 2 % составляет 88 и 96 % соответственно.

В предыдущей статье [2] было показано, что на процессы как спекания, так и кристобалитизации кроме температуры нагрева значительно влияет его скорость, что видно из сопоставления кривых относительного изменения линейных размеров образцов с 2 % силикат-глыбы при различной скорости нагрева — 5 и 10 °С/мин. При этом продолжительность пребывания образца в области «активных» (с точки зрения протекания процессов спекания и кристобалитизации) температур 900–1500 °С различалась в 2 раза (2 и 1 ч соответственно). На рис. 5, д, кривые 1 и 3, показаны сопоставительные данные образцов с 2 % силикат-глыбы после предварительной термообработки при тех же скоростях нагрева — 5 и 10 °С/мин [2]. Показатели dL/L_0 образцов после термообработки при 300 и 500 °С со скоростью 10 °С/мин составляют 0,75 и 0,90 % (кривая 3), что на 85 и 70 % меньше, чем у образцов, нагретых со скоростью 5 °С/мин (кривая 1). Столь же существенная разница отмечается и в содержании кристобалита в сравниваемых образцах. В аналогичном опыте при повышении скорости нагрева до 25 °С/мин содержание кристобалита в образце с добавкой силикат-глыбы 2 % оказалось еще ниже. Исходя из приведенных данных, можно предположить, что при службе сталеразливочных кварцевых огнеупоров, подвергаемых резкому нагреву в начале разливки [1–5, 18], их кристобалитизация начинается только при температуре разливки стали (~1550 °С).

На рис. 6 показано влияние добавки силикат-глыбы на тепловое расширение образцов при

300 и 500 °С, подвергшихся предварительному однократному неизотермическому нагреву до 1500 °С со скоростью 5 °С/мин. Наиболее интенсивное тепловое расширение как при 300, так и при 500 °С характерно для образцов с добавками силикат-глыбы 0,1 и 0,25 %, что свидетельствует о существенном их влиянии на кристобалитизацию. Из рис. 7 следует, что содержание кристобалита, вычисленное из сопоставления экспериментальных данных по тепловому расширению образцов при 300 и 500 °С и образцов эталонного кристобалита, практически совпадает. По сравнению с исходным образцом с содержанием кристобалита 32–34 % в образце с добавкой силикат-глыбы 0,25 % содержание кристобалита увеличивается в 2 раза. Это находится в соответствии с известными литературными данными о влиянии даже малых щелочных примесей или добавок на кристаллизационную способность плавленного кварца [1, 2].

Таким образом, изучено влияние щелочесодержащей добавки водорастворимой силикат-глыбы на степень кристобалитизации и тепловое расши-

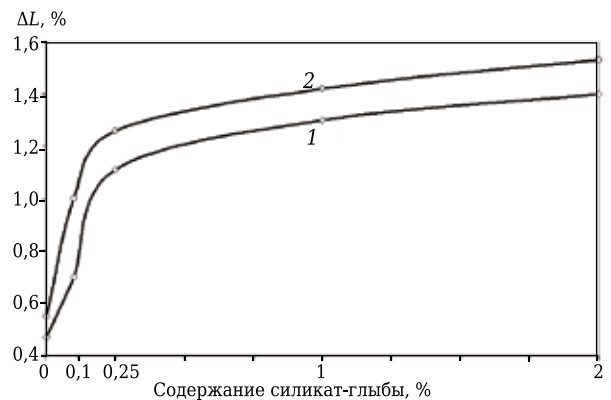


Рис. 6. Влияние добавки силикат-глыбы на ΔL образцов кварцевой керамики, предварительно термообработанных до 1500 °С, при температуре их нагрева 300 (1) и 500 °С (2)

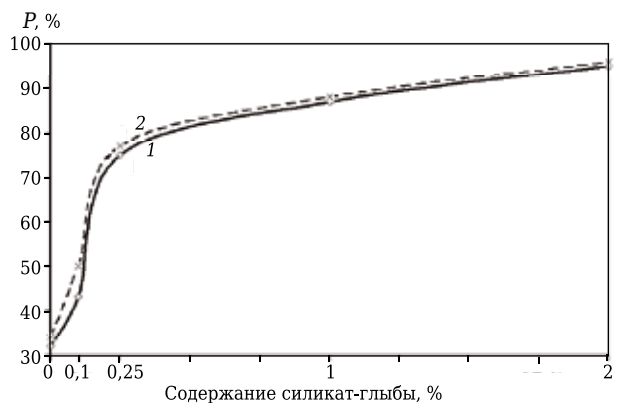


Рис. 7. Влияние добавки силикат-глыбы на содержание кристобалита P в образцах кварцевой керамики, предварительно термообработанных в режиме неизотермического нагрева до 1500 °С, при температуре их нагрева 300 (1) и 500 °С (2)

рение образцов на основе ВКВС плавленного кварца. Установлено, что после неизотермического нагрева со скоростью 5 °С/мин до 1500 °С содержание кристобалита в исходных образцах (без добавок) увеличивается от 32–34 % до 88 и 96 % в образцах

с добавкой силикат-глыбы 1 и 2 % соответственно. Максимальное значение теплового расширения образцов отмечается в интервале 150–300 °С, соответствующем переходу низкотемпературного кристобалита в высокотемпературный.

Библиографический список

1. **Пивинский, Ю. Е.** Кварцевая керамика и огнеупоры. В 2 т. Т. I. Теоретические основы и технологические процессы / Ю. Е. Пивинский, Е. И. Суздальцев ; под ред. Ю. Е. Пивинского. — М. : Теплоэнергетик, 2008. — 672 с.
2. **Пивинский, Ю. Е.** Исследования в области получения материалов на основе ВКВС плавленного 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.
3. **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. 55, № 4. — P. 311–317.
4. **Пивинский, Ю. Е.** Исследования в области получения материалов на основе ВКВС плавленного 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 fused quartz HCBS. Part 2. Quartz steel – pouring refractories / Yu. E. Pivinskii // Refractories and Industrial Ceramics. — 2015. — Vol. 56, № 1. — P. 20–25.
5. **Пивинский, Ю. Е.** Кварцевая керамика и огнеупоры. В 2 т. Т. II. Материалы, их свойства и области применения / Ю. Е. Пивинский, Е. И. Суздальцев ; под ред. Ю. Е. Пивинского. — М. : Теплоэнергетик, 2008. — 464 с.
6. **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.
7. **Ботвинкин, О. К.** Кварцевое стекло / О. К. Ботвинкин, А. И. Запорожский. — М. : Стройиздат, 1965. — 260 с.
8. **Прянишников, В. П.** Система кремнезема / В. П. Прянишников. — Л. : Изд-во лит-ры по стр-ву, 1971. — 237 с.
9. **Торопов, Н. А.** Диаграммы состояния силикатных систем / Н. А. Торопов, В. П. Барзаковский, В. В. Лапин. — М. – Л. : Наука, 1965. — 546 с.
10. Физико-химические свойства окислов : справочник; под ред. Г. В. Самсонова. — М. : Metallurgia, 1978. — 472 с.
11. **Кайнарский, И. С.** Динас / И. С. Кайнарский. — М. : Госиздат по черной и цветной металлургии, 1961. — 470 с.

12. Огнеупорное производство : справочник. В 2 т. Т. 1; под ред. Д. И. Гавриша. — М. : Metallurgia, 1965. — 578 с.
13. **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.
14. **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.
15. **Пивинский, Ю. Е.** Исследования в области получения материалов на основе ВКВС плавленного кварца. Часть 7. Изучение спекания и кристобалитизации огнеупоров центробежного формования / Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин // Новые огнеупоры. — 2015. — № 9. — С. 16–24.
16. **Литовская, Т. И.** Особенности теплофизических свойств безобжиговой кварцевой керамики на основе ВКВС / Т. И. Литовская, Ю. Е. Пивинский, Ф. С. Каплан [и др.] // Огнеупоры. — 1989. — № 11. — С. 41–45.
Litovskaya, T. I. Features of the thermophysical properties a highly concentrated ceramic binder suspension-base unfired quartz ceramic / T. I. Litovskaya, Yu. E. Pivinskii, F. S. Kaplan [et al.] // Refractories. — 1989. — Vol. 30, № 11/12. — P. 701–705.
17. **Пивинский, Ю. Е.** Теоретические аспекты технологии керамики и огнеупоров : избр. тр. Т. 1 / Ю. Е. Пивинский. — СПб. : Стройиздат, 2003. — 544 с.
18. **Пивинский, Ю. Е.** О рекордной стойкости в службе кварцевых защитных труб для разлива стали / Ю. Е. Пивинский, А. М. Гороховский, А. В. Макаров // Новые огнеупоры. — 2004. — № 12. — С. 17, 18.
Pivinskii, Yu. E. Record-breaking durability of quartz protecting tubes for steel teeming tested under service conditions / Yu. E. Pivinskii, A. M. Gorokhovskii, A. V. Makarov // Refractories and Industrial Ceramics. — 2005. — Vol. 46, № 1. — P. 27, 28. ■

Получено 12.01.16
© Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин,
А. Ю. Колобов, 2016 г.