
ОСОБЕННОСТИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И СВОЙСТВ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА, ПОЛУЧЕННОГО НА ПЛАЗМОТРОНАХ ОАО “ДИНУР” ИЗ КВАРЦЕВОГО ПЕСКА РАМЕНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

© 2020 г. А. Ю. Колобов¹, Г. А. Сычева², *

¹ОАО “ДИНУР”, ул. Ильича, 1, Первоуральск, Свердловская область, 623103 Россия

²Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН, наб. Макарова, 2,
Санкт-Петербург, 199034 Россия

*e-mail: sycheva_galina@mail.ru

Поступила в редакцию 28.10.2019 г.

После доработки 30.01.2020 г.

Принята к публикации 05.02.2020 г.

Рассмотрены особенности кристаллизации и свойств кварцевого стекла, сырьем для плавки которого является кварцевый песок производства Раменского горно-обогатительного комбината. Установлено, что продукт плавки кварцевого песка из указанного сырья с повышенным содержанием примесей отличается пониженной устойчивостью к кристаллизации.

Ключевые слова: кварцевое стекло, песок Раменского ГОК, содержание примесных компонентов, особенности кристаллизации, устойчивость к кристобалитизации, зависимости от температуры

DOI: 10.31857/S0132665120030063

ВВЕДЕНИЕ

Исследованиям свойств кварцевого стекла, получаемого как традиционными методами, так и золь-гель методом (совокупностью гидролиза тетраалкоксисиланов и поликонденсации образующихся соединений) посвящено значительное количество публикаций [1–3]. Свойства исходного сырьевого материала являются определяющими характеристиками физико-химических процессов, происходящих при плавке кварцевого стекла. От них зависят и свойства синтезированного стекла. Устойчивость кварцевого стекла к кристаллизации является одной из важнейших характеристик этого материала, определяет возможности и условия применения изделий из него при высоких температурах. Кристаллизация происходит на технологических включениях и дефектах стекломассы. На кристаллизацию кварцевого стекла сильное влияние оказывают различные примеси [1]. Отдельно в литературе рассматривается кристаллизация на газовых пузырьках [4–20]. В табл. 1 приведены данные по влиянию пузырьковой структуры на кристаллизацию в стеклах различных систем.

Для синтеза кварцевых стекол в качестве исходных сырьевых материалов используют природный и синтетический кварц [21], кристобалит, аморфный SiO_2 , летучие соединения кремния: SiCl_4 , $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ и др. [22]. В настоящее время, в условиях импортозамещения, особое внимание исследователей обращается на получение продукта из отечественного сырья. В данной работе исследовали особенности кристаллизации и свойств кварцевого стекла, полученного на плазматронах ОАО “Динур” из кварцевого песка Раменского месторождения.

Таблица 1. Влияние пузырьковой структуры на кристаллизацию в стеклах различных систем по данным разных авторов

| № ссылки | Автор | Год | Система | Составы | Вывод о наличии кристаллизации на пузырьках и ее влиянии на зарождение кристаллов |
|----------|-----------------------------|------|--|---|---|
| 4 | Tamman | 1898 | $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ | Не указан | Влияет |
| 5 | Tabata | 1927 | $\text{PbO}-\text{SiO}_2$ | $\text{PbO} \cdot 3\text{SiO}_2$, $\text{PbO} \cdot 2.5\text{SiO}_2$ | Не влияет |
| 6 | Morey | 1930 | $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ | 87 различных составов | Не влияет |
| 7 | Scott, Pask | 1961 | $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ | $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$ | Не влияет |
| 8 | Klinsberger | 1964 | $\text{BaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{TiO}_2$ | $(36-40)\text{BaO} \cdot (22-25)\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (7-11)\text{TiO}_2 \cdot (30-31)\text{SiO}_2$ мас. % | Влияет на кристаллизацию на поверхности вскрытого пузыря |
| 9 | Neely, Ernsberger | 1966 | $\text{SiO}_2-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{Na}_2\text{O}$ | $71.6\text{SiO}_2 \cdot 11.7\text{CaO} \cdot 2.5\text{MgO} \cdot 13.8\text{Na}_2\text{O} + 0.4$ примеси | Кристаллизация на примесях, образующихся на поверхности пузырей |
| 10 | Bergeron Deluca | 1967 | $\text{PbO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ | $54\text{PbO} \cdot 40\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ мол. % | Влияет |
| 11 | Mattox | 1967 | $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3$ | $41\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 53\text{B}_2\text{O}_3$ мол. % | Влияет на кристаллизацию на примесях, образующихся на поверхности пузырей |
| 12 | Комарова | 1974 | SiO_2 | SiO_2 | Влияет на кристаллизацию на поверхности вскрытого пузыря |
| 13 | Леко, Комарова | 1975 | SiO_2 | SiO_2 | Не влияет |
| 14 | Леко | 1982 | SiO_2 | SiO_2 | Влияет на кристаллизацию на поверхности вскрытого пузыря |
| 15 | Боганов, Руденко, Черемисин | 1984 | SiO_2 | SiO_2 | Влияет на поверхностную кристаллизацию кристобалита |
| 16 | Volksch, Heide | 1997 | $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ | $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$ | Влияет на поверхностную кристаллизацию |
| 17 | Сычева | 1998 | $\text{Na}_2\text{O}-\text{ZnO}-\text{P}_2\text{O}_5$ | $10\text{Na}_2\text{O} \cdot 57\text{ZnO} \cdot 33\text{P}_2\text{O}_5$ мол. % | Высказано предположение, что зарождение происходит на пузырьках |
| 18 | Davis, Ihinger | 1998 | $\text{Li}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ | $\text{Li}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ | Влияет |
| 19 | Сычева | | $\text{Li}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ | $26\text{Li}_2\text{O} \cdot 74\text{SiO}_2$ | Высказано предположение, что зарождение дисиликата лития происходит на пузырьках |
| 20 | Сычева | | $\text{Li}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ | $26\text{Li}_2\text{O} \cdot 74\text{SiO}_2$ | Доказано, что зарождение дисиликата лития происходит на пузырьках |



Рис. 1. Внешний вид исходного кварцевого песка Раменского ГОК.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Рентгенофазовый анализ (РФА) выполняли на установке ДРОН-7. Кривые нагревания кварцевых стекол получали на высокотемпературном dilatометре DIL-402 фирмы Netzsch. Оптическую микроскопию в отраженном свете выполняли на микроскопе Neophot 32, в проходящем – на микроскопе Jenaval (оба производства фирмы Carl Zeiss, Jena, Германия).

Характеристика исходного сырья. В ОАО “ДИНУР” в качестве сырья для производства кварцевого стекла используют кварцевый песок месторождения “Раменское”, обогащенный и очищенный на Раменском горно-обогатительном комбинате (ГОК). В центральной заводской лаборатории проводят химический анализ получаемого из ГОК сырья. По данным химического анализа кварцевого песка, полученного из различных участков месторождения, в основном на 99.2 ± 0.2 он состоит из SiO_2 , а в качестве примесей обнаружены оксиды железа, титана, кальция, алюминия и вода. На рис. 1 приведен внешний вид кварцевого песка Раменского ГОК.

Плавка кварцевого песка. Плавку кварцевого песка осуществляли в плазмотронах. Рабочий ток дуги реактора составляет 1300–1400 А при напряжении 300–400 В (точные характеристики плавки зависят от качества песка – содержания в песке примесей оксидов алюминия и железа). Кварцевый песок подается на дугу плазмотрона в плазменной установке. Плавку основного слитка кварцевого стекла осуществляли на подложку из того же материала. При наплавлении (нарастании) слитка он постепенно опускается вниз. На рис. 2 приведены фотографии различных этапов выработки стекла. На первых двух фото (2а, 2б) запечатлена подложка, заготовленная для плавки. Слиток в виде стержня (масса 600–680 кг) в процессе плавки находится в вертикальном положении. На следующем снимке идет плавка. На рис. 2г стержень сфотографирован издалека. Позже, когда он остынет, его будут вытягивать из плазмотрона.

После плавки слиток вытягивали из плавильной камеры и помещали в зону охлаждения (рис. 2д), где он очищается от шубы (внешняя оболочка слитка), загрязнений, включений графитовых электродов. Очищенные слитки измельчаются сначала в щековой, а затем в роторной дробилках и сортируются по фракциям на 0–5 мм и выше 5 мм. Фракция более 5 мм возвращается на дополнительное дробление, а фракция 0–5 мм на виброситах рассеивается на более мелкие фракции. Следующий этап – это подготовка

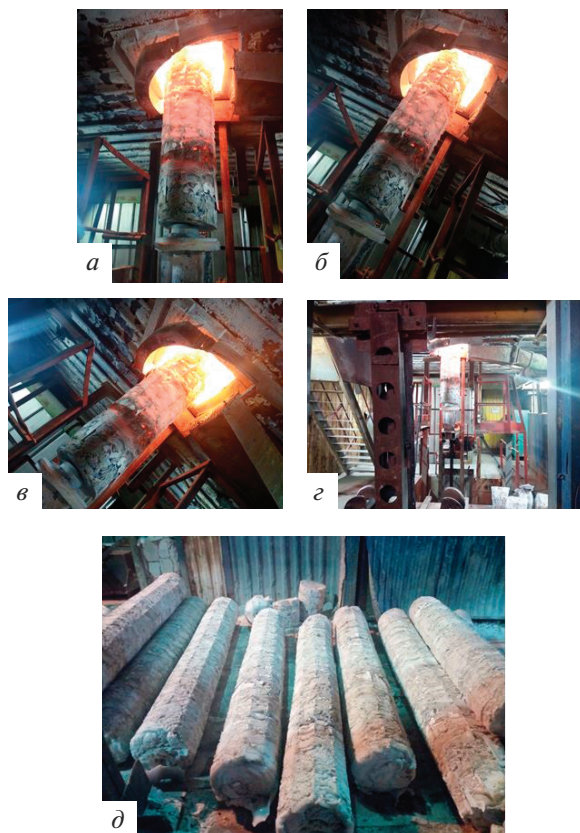


Рис. 2. Фотографии различных этапов выработки стекла (*a–c*). Слитки кварцевого стекла, полученные в результате плавления кварцевого песка (*d*).

литейного шликера кварцевого стекла, который идет на производство кварцевых изделий. Готовые изделия подвергаются обжигу и сушке. Последняя стадия – сборка готовых изделий.

В табл. 2 приведен результат химического анализа кварцевого стекла в мас. %, полученного для различных независимых плавков. Рассмотрены результаты химического анализа кварцевого стекла плавков, проводимых в течение 2017–2019 гг.: 2017 – 252 плавки, 2018 – 510 плавков, 2019 – 131 плавка. Всего получены результаты для 893 плавков. В табл. 2 приведены данные первой, каждой сотой и 893 плавки для содержания оксидов Fe_2O_3 , TiO_2 , CaO , Al_2O_3 , SiO_2 .

Из данных химического анализа кварцевого стекла, синтезированного плавлением песка, полученных из различных его участков, в основном на 99.2 ± 0.1 мас. % он состоит из SiO_2 , а в качестве примесей обнаружены оксиды железа, титана, кальция и алюминия. Содержание оксида алюминия в динасах, кварцитах, керамике и стекле определяется согласно ГОСТа 2642.4.

Слиток, полученный в результате плавления, представляет собой цилиндр в несколько метров в длину и около полуметра в диаметре. Внешняя корка слитка (т. н. “шуба”) представляет собой не проплавленную часть слитка, внутри которой нахо-

Таблица 2. Химический состав кварцевого стекла, мас. %, по анализу

| № пробы | Fe ₂ O ₃ | TiO ₂ | CaO | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ |
|---------|--------------------------------|------------------|------|--------------------------------|------------------|
| 1 | 0.07 | — | 0.02 | 0.26 | 99.2 |
| 100 | 0.06 | — | 0.05 | 0.22 | 99.2 |
| 200 | 0.04 | 0.01 | 0.02 | 0.20 | 99.3 |
| 300 | 0.04 | — | 0.01 | 0.29 | 99.1 |
| 400 | 0.04 | 0.01 | 0.02 | 0.27 | 99.2 |
| 500 | 0.05 | 0.01 | 0.02 | 0.25 | 99.2 |
| 600 | 0.09 | — | 0.03 | 0.33 | 99.1 |
| 700 | 0.03 | — | 0.03 | 0.29 | 99.2 |
| 800 | 0.05 | — | 0.02 | 0.20 | 99.3 |
| 893 | 0.07 | — | 0.04 | 0.21 | 99.2 |

дится готовый продукт плавки — кварцевое стекло. По данным химического анализа кварцевого стекла, содержание Al₂O₃ составляет 0.25 мас. % и Fe₂O₃ 0.05 мас. %.

Результаты рентгенофазового анализа кварцевого стекла. Рентгенограммы полученного продукта плавки имеют характерный вид аморфного образца 20° (рис. 3в, кривая черного цвета). Для кварцевого стекла характерно наличие ближнего порядка — наличие закономерности в расположении только для соседних атомов или молекул (1–10 Å). Линия кварца на рентгенограмме может указывать на “непроплав”, появление пика кристобалита можно объяснить особенностями режима плавки. По данным рентгенофазового анализа (РФА), наибольшее количество кварца (10–12%) было обнаружено в плотной корке на поверхности слитка. Содержание кристобалита в корке не превышало 2.0%. Минералогический состав большинства исследуемых образцов кварцевого стекла, очищенного от поверхностной кристаллической корки, представлен чистым силикатным стеклом. Кварц и кристобалит не были идентифицированы с помощью РФА и микроскопии в большинстве образцов. В тех образцах, где присутствие кристобалита было установлено методом РФА (в некоторых случаях до 1.0%), петрографическое исследование подтвердило зарождение кристаллов на пузырьках газа, трещинах, вдоль свай или на границе инородных включений. В качестве таких включений могут выступать, например, частицы электродного графита или металла оборудования.

Получены дифрактограммы кварцевого стекла при температурах 1200, 1300 и 1400°С с выдержкой 1, 2 и 5 ч для каждой температуры (рис. 3а–3е).

Оценку количества образовавшейся кристаллической фазы проводили на основе использования эталона и данных, как о величине интегральной интенсивности, так и о высоте дифракционного пика, определяемого для кристобалита при данном угле рассеяния. Эталонном служил максимально закристаллизованный при данной температуре образец. В качестве величины, характеризующей степень закристаллизованности, использовали отношение α (% кристобалита)

$$\alpha = V(T, t) / V_{\max},$$

где $V(T, t)$ — объем образовавшейся фазы кристобалита при температуре T в момент времени t , V_{\max} — объем, соответствующий полной длительности эксперимента. Для устранения эффекта текстурирования проводили десятикратное измерение интенсивности эталоном, использовали среднее значение. Интенсивность рассеяния изучаемых образцов усредняли по результатам всех измерений. Погрешность определения количества кристаллической фазы не превышала 5%. Оценку количества кристаллической фазы проводили с помощью интегральной интенсивности, высоты пика, кото-

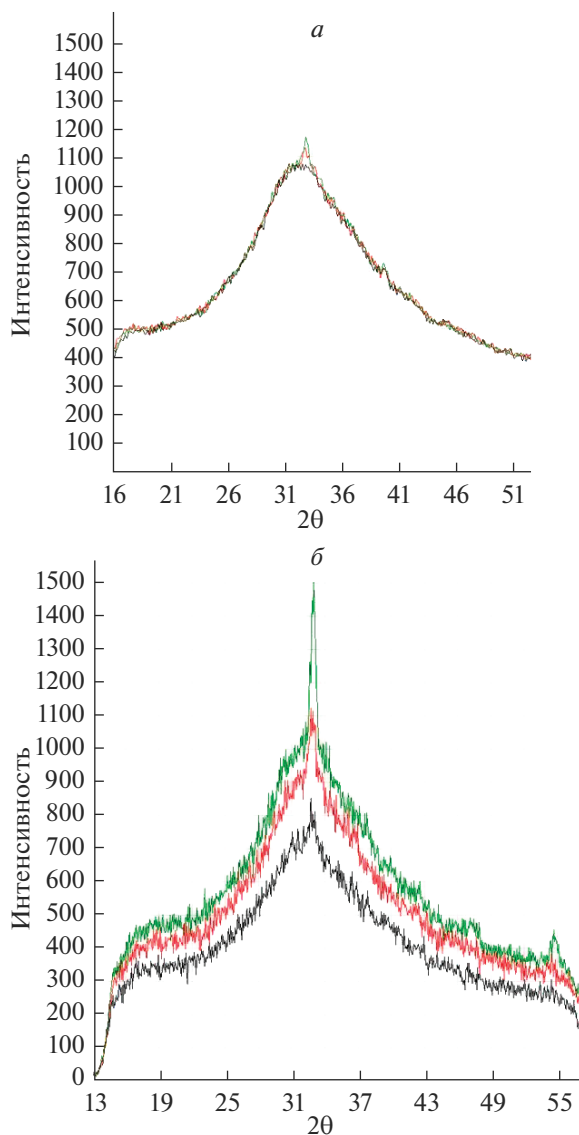


Рис. 3. Дифрактограммы кварцевого стекла после термообработки при 1400°С в течение 1 (кривая зеленого цвета), 2 (кривая синего цвета) и 5 (кривая красного цвета) час. Кривая черного цвета – исходное стекло без термообработок..

рую можно использовать вместо интегральной интенсивности при достаточно узких пиках на дифрактограммах [23]. Для всех дифрактограмм, представленных на рис. 3, проводили базовую линию, от которой отсчитывали высоту пика, ответственного за кристаллизацию кристобалита. Затем проводили сопоставление высоты этого пика, сравнивая со значениями, полученными для других времен и температур обработки.

Для температуры 1200°С содержание кристобалита составляет для обжига 1–2–5 часов, соответственно, 0,0–0,7–1,1%. На рентгенограмме присутствует кварц в количестве не

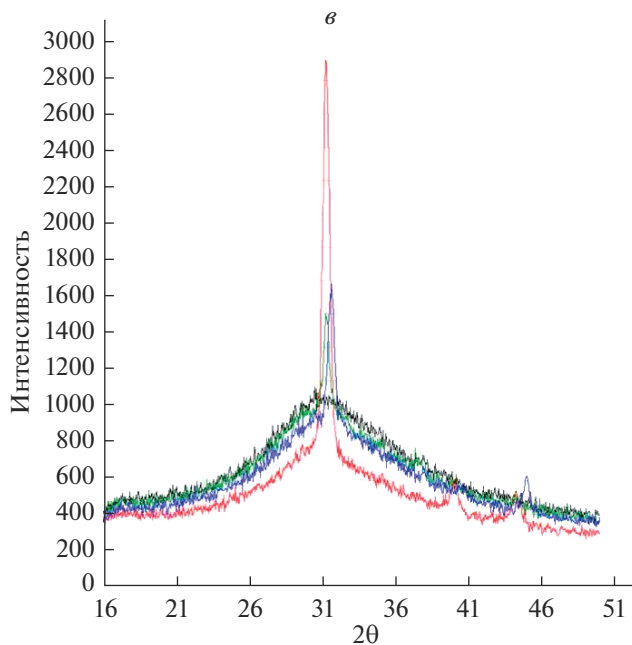


Рис. 3. Окончание

более 0.5%; для температуры 1300°C содержание кристобалита составляет для обжига 1–2–5 ч, соответственно, 1.0–2.0–5.0%; для температуры 1400°C содержание кристобалита составляет для обжига 1–2–5 ч, соответственно, 6.0–8.0–23.0%. Из рис. 3в, видно, что на рентгенограмму для термообработок при 1400°C градусам наложена дифрактограмма исходного стекла. На рис. 4 представлены рассчитанные из данных рис. 3 зависимости количества кристобалита для времени термообработок 1, 2 и 5 ч при разных температурах обжига.

Из рис. 4 видно, что наиболее интенсивно образование кристобалита происходит при температуре 1400°C.

Зависимости относительного изменения линейных размеров от температуры. На высокотемпературном dilatометре DIL-402 фирмы Netzsch получены кривые термического расширения кварцевых стекол (рис. 5).

Данные, аналогичные рис. 5, позволили оценить теплофизические характеристики для кварцевого стекла и изделий на его основе.

Зарождение кристаллов кристобалита в кварцевом стекле по данным оптической микроскопии. Были изучены образцы из центральной и краевой части слитка. В первом случае отклонений в оптических свойствах вещества не наблюдали. По всему объему, и вокруг газовых пузырей материал не просветлялся при включенном анализаторе (рис. 6а). В краевых частях слитка (“шубе”) (рис. 6б) зафиксировали зоны с аномальным волнистым угасанием от сосредоточенных в местах скопления пустот от выхода газовой составляющей. Согласно данным РФА здесь отмечается наибольшее количество кристобалита.

По данным, аналогичным рис. 6а были определены размеры кристаллов кристобалита и построены распределения по размерам.

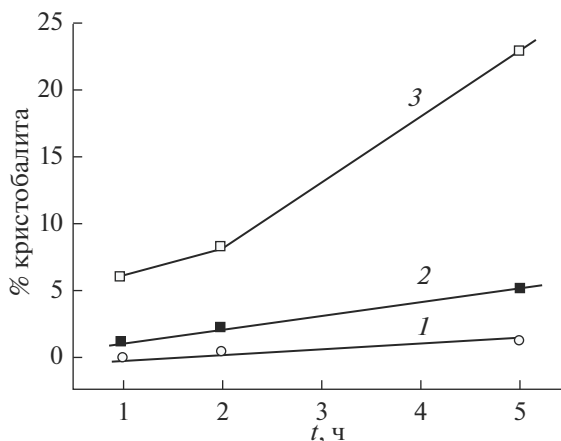


Рис. 4. Рассчитанные из данных рис. 3 зависимости количества кристобалита для времени термообработок 1, 2 и 5 ч при температурах: 1200°C (1), 1300°C (2), 1400°C (3).

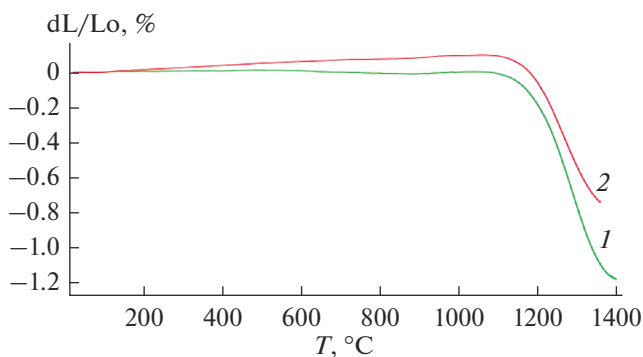


Рис. 5. Зависимости относительного изменения линейных размеров от температуры для кварцевых оболочек ОКСБ: кривая первичного нагрева (1), кривая вторичного нагрева со скоростью нагрева 5°C/мин (2).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Стеклообразный кремнезем начинает кристаллизоваться с поверхности. Образцы из кварцевого стекла при температурах выше 1000°C стабильны. Коэффициент термического расширения (КТР) стекла и кристобалита при этих температурах близки и возникающие при этом напряжения быстро релаксируют. Частично закристаллизовавшийся образец стекла остается прозрачным и почти неотличимым от основного стекла. Кристаллизация повышает жесткость изделия из кварцевого стекла — закристаллизованные изделия можно использовать вплоть до температуры плавления кристобалита. При изотермической выдержке образцов кварцевого стекла наблюдаются два этапа процесса кристаллизации: индукционный период и рост кристаллического слоя. Индукционный период характеризуется отсутствием признаков появления кристаллов. Экспериментально длительность (величина) индукционного периода определяется следующим образом. Толщина кристаллического слоя сначала возрастает нелинейно со временем, а затем выходит на линейный участок роста. Тангенс угла наклона

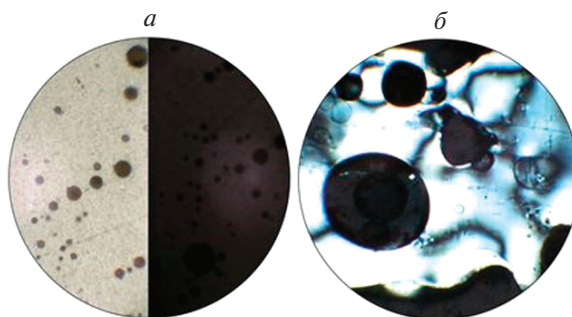


Рис. 6. Микроструктура центральной части (а) и краевой части (б) слитка кварцевого стекла. Условия съемки: увеличение $\times 50$ в обычном (слева) и поляризованном (справа) свете (а), увеличение $\times 100$, поляризованный свет (б). Условия термообработки: $T = 1300^\circ\text{C}$, $t = 5$ ч.

линейного участка зависимости дает значение стационарной скорости роста, $U_{\text{ст}}$. Пересечение продолжения линейного участка зависимости с осью времени определяет индукционное время зарождения $t_{\text{инд}}$. Это время, необходимое для достижения скоростью роста стационарного значения. Перпендикуляр, опущенный из точки пересечения продолжения линейного участка зависимости с осью времени, определяет на оси времени значение параметра τ (время нестационарности). Величины $t_{\text{инд}}$ и τ (время нестационарности) связаны соотношением $\tau = 6t_{\text{инд}}/\pi^2$. Для кварцевого стекла на начальной стадии роста слоя (до 10 мкм) скорость роста слоя, как правило, меньше достигаемой позже стационарной скорости $U_{\text{ст}}$ [21]. Для описания движения фазовой границы от поверхности в глубь стекла [22] для кварцевого стекла обычно пользуются моделью нормального роста [24]. В [25] нами было установлено, что продукт плавки кварцевого песка из исходного сырья раменского месторождения отличается пониженной устойчивостью к кристаллизации. Аналогичные результаты были получены в [26, 27], в которых в качестве исходного сырья для получения кварцевого стекла использовали пески другого происхождения. В частности, в [27] – кварциты месторождения Бурал–Сардык.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что продукт плавки кварцевого песка из исходного сырья – кварцевый песок месторождения Раменское – отличается пониженной устойчивостью к кристаллизации. Основными кристаллическими фазами, обнаруженными в кварцевом стекле, синтезированном из данного сырья, являются кварц и кристобалит. В плотной корке на поверхности слитка было обнаружено 10–12% кварца, содержание кристобалита в корке не превышало 2.0%. Минералогический состав большинства исследуемых образцов кварцевого стекла, очищенного от поверхностной кристаллической корки, представлен чистым кварцевым стеклом. Кварц и кристобалит не были обнаружены с помощью РФА и микроскопии в большинстве исходных образцов. В тех образцах, где присутствие кристобалита было установлено методом РФА, петрографическое исследование подтвердило зарождение кристаллов на посторонних примесях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tiller W.A., Jackson K.A., Rutter J.W., Chalmers B. The redistribution of solute atoms during the solidification of metals // Acta Metallurg. 1953. V. 1. № 7. P. 428–437.
2. Прянишников В.П. Система кремнезема. Л.: Изд. литературы по строительству, 1971. 238 с.
3. Dambaugh W.H., Schults P. Vitreous silica // Encyclopedia of chemical technology. 2 ed. N.Y. 1969. V. 18. P. 73–102.
4. Tamman G. Über die Abhängigkeit der Zahl der Kerne welche sich in verschiedenen unterkühlten Flüssigkeiten bilden, von der Temperatur // Z. Phys. Chem. 1898. Bd. 25. H. 3. S. 441–479.
5. Tabata K. On the causer of the surface devitrification of glasses // J. Amer. Ceram. Soc. 1927. V. 10. № 1. P. 6–22.
6. Morey G.W. The devitrification of soda–lime–silica glasses // J. Amer. Ceram. Soc. 1930. V. 13. № 10. P. 683–713.
7. Scott W.D., Pask J.A. Nucleation and growth of sodium disilicate crystals in sodium disilicate glass // Amer. Ceram. Soc. 1961. V. 44. № 4. P. 181–187.
8. Klinsberg C. Bubble–induced nucleation and crystal growth in glass // J. Amer. Ceram. Soc. 1964. V. 47. № 2. P. 97–100.
9. Neely J.E., Ernsberger F.M. Absence of devitrification of bubble surface in soda–lime glasses // J. Amer. Ceram. Soc. 1966. V. 49. № 7. P. 396–397.
10. Bergeron C.G., Deluca J.P. Crystal growth at bubble surface in glass // J. Amer. Ceram. Soc. 1967. V. 50. № 2. P. 116–117.
11. Mattox D.M. Contamination – nucleated crystal growth at bubble surface in glass // J. Amer. Ceram. Soc. 1967. V. 50. № 12. P. 683–689.
12. Комарова Л.А. Исследование закономерностей кристаллизации кварцевых стекол: Автореф. ... канд. хим. наук. Л. 1974. 23 с.
13. Лeko В.К., Комарова Л.А. Кристаллизация кварцевых стекол в различных газовых средах // Изв. АН СССР. Неорг. матер. 1975. Т. 2. № 6. С. 1115–1120.
14. Лeko В.К. Влияние физико-химических процессов, происходящих при синтезе и тепловой обработке, на свойства стеклообразного кремнезема // Физ. и хим. стекла. 1982. Т. 8. № 2. С. 129–148.
15. Боганов А.Г., Руденко В.С., Черемисин И.И. Механизм образования и роста пузырей в кварцевом стекле // Физ. и хим. стекла. 1984. Т. 10. № 2. С. 208–216.
16. Volksch G., Heide K. Dissolved gases and minor component effects on glass crystallisation // J. Non-Crystalline Solids. 1997. V. 219. P. 119–127.
17. Сычева Г.А. Зарождение кристаллов натрий–цинк–фосфата в натриевоцинковофосфатном стекле // Физ. и хим. стекла. 1998. Т. 24. № 5. С. 575–581.
18. Davis M.J., Ihinger P. Nucleation and crystal growth in lithium disilicate glass // Dep. of Geology and Geophysics. Amer. Mineralogist. 1998. V. 83. P. 1008–1015.
19. Сычева Г.А. Образование пузырьковой структуры в стекле состава $26\text{Li}_2\text{O} \cdot 74\text{SiO}_2$, мол. % // Физ. и хим. стекла. 2009. Т. 35. № 3. С. 342–351.
20. Сычева Г.А. Влияние пузырьковой структуры на параметры зарождения кристаллов в стекле состава $26\text{Li}_2\text{O} \cdot 74\text{SiO}_2$ // Физ. и хим. стекла. 2009. Т. 35. № 6. С. 798–811.
21. Лeko В.К., Комарова Л.А. Исследование индукционного периода кристаллизации кварцевых стекол // Изв. АН СССР. Неорг. матер. 1971. Т. 7. № 12. С. 2240–2244.
22. Ulmann D.R. Crystal growth in glass-forming systems – a review // Advances in nucleation and crystallization in glasses. Columbus. 1972. P. 91–115.
23. Зевин Л.С., Завьялова Л.Л. Количественный рентгенографический фазовый анализ. М.: Недра. 1974. 184 с.
24. Ainslie N.G., Morelock C.R., Turnbull D. Devitrification kinetics of fused silica // Symposium on nucleation and crystallization in glasses and melts. Columbus. 1962. P. 97–107.
25. Kolobov A.Yu., Sycheva G.A. Quartz Glass Obtained from Ramenskii Sand on Dinur Plasma Torch: Features of Crystallization on Polished Surface // Physics of the Solid State. 2019. V. 61. № 12. P. 2359–2362.
26. Пивинский Ю.Е., Дякин П.В., Колобов А.Ю. Исследования в области получения материалов на основе ВКВС плавленного кварца. Часть 8. Влияние щелочных добавок на спекание и кристобалитизацию керамики в режиме неизотермического нагрева // Новые огнеупоры. 2016. № 1. С. 22–28.
27. Непомнящих А.И., Шалаев А.А., Сизова Т.Ю., Сапожников А.Н., Паклин А.С. Исследование процессов кристаллизации стекла из кварцитов месторождения Бурал–Сардык // География и природные ресурсы. 2016. № 6. С. 60–64.