

УДК 631.365

ВОЛОКИТИН ОЛЕГ ГЕННАДЬЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент,
volokitin_oleg@mail.ru

ШЕХОВЦОВ ВАЛЕНТИН ВАЛЕРЬЕВИЧ, студент,
shehovcov2010@yandex.ru

Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2

РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ РАСПЛАВЛЕНИЯ ЧАСТИЦЫ КВАРЦА В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ СИЛИКАТНОМ РАСПЛАВЕ*

В работе проведен расчет времени расплавления частицы кварца при попадании ее в высокотемпературный силикатный расплав. Определена зависимость времени плавления от радиуса частицы с учетом зависимости коэффициента теплообмена от радиуса твердой части частицы на этапе плавления и с учетом фазовых переходов. Установлено, что частицы размером 2 мм (радиусом 1 мм) полностью расплавляются за время 2,61 с, частицы размером 0,4 мм расплавляются за 0,1 с.

Ключевые слова: низкотемпературная плазма; математическое моделирование; частица кварца; силикатный расплав.

OLEG G. VOLOKITIN, PhD, A/Professor,
volokitin_oleg@mail.ru

VALENTIN V. SHEKHOVTSOV, Student,
shehovcov2010@yandex.ru

Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia

TIME-OF-MELTING CALCULATION FOR QUARTZ PARTICLE IN HIGH TEMPERATURE MELT

The paper presents the calculation of melting time for a quartz particle in a high-temperature silicate melt. The dependence between the melting time and the radius of quartz particle is determined accounting for the dependence of the heat exchange rate upon the radius of the solid quartz particle at the stage of melting and phase transformations. It is shown that 2 mm quartz particles having radius of 1 mm, melt completely during 2,61 s, while 0,4 mm quartz particles melt during 0,1 s.

Keywords: low-temperature plasma, mathematical modeling; quartz particle; silicate melt.

Песок, распространенный в природе, чаще всего представляет собой зерна кремнезема (SiO_2) [1]. Среди материалов, создаваемых на основе кремнезема, особое место принадлежит кварцевому стеклу. Способы получения изделий из кварцевого песка резко отличаются от методов, принятых в технологии обычного стекла. Последнее обусловлено исключительно высо-

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 15-38-50326 мол_нр.

кой вязкостью расплава кремнезема даже при температурах, превышающих 2000 °С, и вместе с тем повышенной его летучестью [2–3]. Использование низкотемпературной плазмы, которая обладает высокой концентрацией энергии и температурой 3000–5000 °С, позволит достичь необходимой вязкости расплава и обеспечить равномерный его прогрев [4–7].

Цель работы: провести расчет процесса расплавления частицы кварца при попадании ее в высокотемпературный силикатный расплав.

Осуществить экспериментальные исследования по плавлению кварца предлагается на разработанной электроплазменной установке для получения высокотемпературных силикатных расплавов [8, 9]. Теплоносителем в установке служит поток плазмообразующего газа, который в виде высокотемпературной струи истекает из выходного сопла плазмотрона. После заполнения установки высокотемпературным силикатным расплавом подаваемые в плавильную печь частицы кварца сразу попадают в расплав. Изначально полагалось, что нагреву подвергается песок, состоящий из β -кristобалита. Однако наиболее распространенной формой существования диоксида кремния SiO_2 является α -кварц. При нагреве α -кварц претерпевает фазовые переходы, при которых меняется плотность ρ_{ch} и удельная теплоемкость c_{ch} вещества. Фазовым состояниям соответствуют следующие значения параметров:

α -кварц: $c_{\alpha \text{ кв}} = 728$ Дж/кг, $\rho_{\alpha \text{ кв}} = 2655$ кг/м³;

β -кварц: $c_{\beta \text{ кв}} = 1140$ Дж/кг, $\rho_{\beta \text{ кв}} = 2530$ кг/м³;

β -кristобалит: $c_{\beta \text{ кр}} = 1222$ Дж/кг, $\rho_{\beta \text{ кр}} = 2232$ кг/м³.

В расчетах полагалось, что при достижении температуры фазового перехода ρ_{ch} и c_{ch} меняются скачком. Температура плавления и удельная теплота плавления соответствовали β -кristобалиту и были равны:

– температура плавления $T_{пл} = 1713$ С;

– удельная теплота плавления $q_{пл} = 142$ кДж/кг.

Качественный вид изменения температуры частицы, находящейся в высокотемпературном силикатном расплаве во времени от момента начала нагрева до момента полного расплавления для $r_{\text{ч}} = 10^{-3}$, представлен на рис. 1.

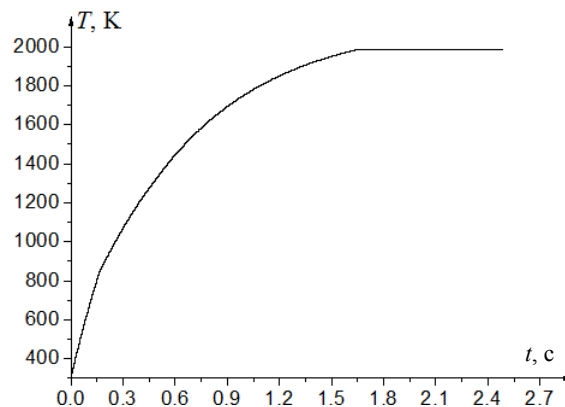


Рис. 1. Изменение температуры частицы во времени при учете фазовых переходов в системе, $r_{\text{ч}} = 10^{-3}$ м

На рис. 2 представлен график зависимости времени расплавления от радиуса частицы при учете зависимости коэффициента теплообмена от радиуса твердой (кристаллической) части частицы песка на этапе плавления и учете фазовых переходов в системе. Результаты расчета представлены в таблице.

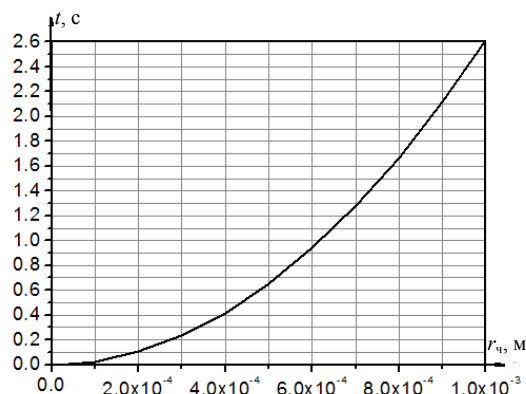


Рис. 2. Зависимость времени плавления от начального радиуса частиц $r_{\text{ч}}$

**Зависимость времени плавления от радиуса частицы
с учетом зависимости коэффициента теплообмена
от радиуса твердой (кристаллической) части частицы
на этапе плавления и с учетом фазовых переходов**

$r_{\text{ч}}, \text{ м}$	10^{-6}	$2 \cdot 10^{-6}$	10^{-5}	$2 \cdot 10^{-5}$	10^{-4}	$2 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}
$t, \text{ с}$	$2,6 \cdot 10^{-6}$	10^{-5}	$2,6 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}	$2,6 \cdot 10^{-2}$	0,1	2,61

Согласно результатам расчетов фазовые переходы в системе приводят к увеличению времени плавления частиц.

Из расчетов были получены зависимости времени, необходимого для полного расплавления частицы, от ее размера. Расчеты показывают, что частицы размером 2 мм (радиусом 1 мм) полностью расплавляются за 2,61 с, частицы размером 0,4 мм расплавляются за 0,1 с.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Щедровицкий, Я.С. Высококремнистые ферросплавы / Я.С. Щедровицкий. – Свердловск : Свердловск. отд. ГНТИ Лит. по черн. и цвет. мет., 1961. – 256 с.
2. Пивинский, Ю.Е. Кварцевая керамика / Ю.Е. Пивинский, А.Г. Ромашин. – М. : Металлургия, 1974. – 264 с.
3. Айлер, Р. Химия кремнезема / Р. Айлер. – М. : Мир, 1982. – 460 с.
4. Volokitin, O.G. Technology for Plasma Treatment of Molybdenum Ore Tailings / O.G. Volokitin, N.K. Skripnikova, V.V. Shekhovtsov // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – № 682. – P. 515–518.
5. Unsteady regimes of hydrodynamics and heat transfer at production of high-temperature silicate melts. / N.S. Bondareva, O.G. Volokitin, O.O. Morozova, M.A. Sheremet // Thermophysics and Aeromechanics. – 2013. – № 20. – P. 621–629.

6. *Definition of nanostructural characteristics melting product of quartz sand* / O.G. Volokitin, G.G. Volokitin, N.K. Skripnikova, V.V. Shekhovtsov // International conference on physical mesomechanics of multilevel systems. – 2014. – № 1623. – P. 655–658.
7. *Volokitin, O.G.* Plasma treatment technology for silicate melt used in mineral fiber production / O.G. Volokitin, V.V. Shekhovtsov, E.A. Maslov // Advanced materials research. – 2014. – № 880. – P. 233–236.
8. *Пат. 2503628 Российская Федерация. C03 B37/04.* Плазменная установка для получения тугоплавкого силикатного расплава / О.Г. Волокитин, Е.В. Тимонов, Г.Г. Волокитин, А.А. Никифоров, В.К. Чибирков ; опубл. 10.01.2014, Бюл. № 1.
9. *Электродуговые и электроплазменные устройства для переработки силикатсодержащих отходов* / Г.Г. Волокитин, Н.К. Скрипникова, О.Г. Волокитин, В.В. Шеховцов // Изв. вузов. Физика. Январь. – 2014. – № 3/3. – С. 114–119.

REFERENCES

1. *Shchedrovitskii Ya.S.* Vysokokremnistye ferrosplavy [High silica ferroalloys]. Sverdlovsk : Sverdlovsk, GNTI Publ., 1961. 256 p. (rus)
2. *Pivinskii Yu. E., Romashin A.G.* Kvartsevaya keramika [Quartz ceramics]. Moscow : Metallurgiya Publ., 1974. 264 p. (rus)
3. *Ailer R.* Khimiya kremnezema [Chemistry of silica]. Moscow : Mir Publ., 1982. 460 p. (rus)
4. *Volokitin O.G., Skripnikova N.K., Shekhovtsov V.V.* Technology for plasma treatment of molybdenum ore tailings. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. No. 682. Pp. 515–518.
5. *Bondareva N.S., Volokitin O.G., Morozova O.O., Sheremet M.A.* Unsteady regimes of hydrodynamics and heat transfer at production of high-temperature silicate melts. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2013. No. 20. Pp. 621–629.
6. *Volokitin O.G., Volokitin G.G., Skripnikova N.K., Shekhovtsov V.V.* Definition of nanostructural characteristics melting product of quartz sand. *Proc. Int. Conf. Phys. Mesomech. Multilevel Syst.* 2014. No. 1623. Pp. 655–658.
7. *Volokitin O.G., Shekhovtsov V.V., Maslov E.A.*, Plasma treatment technology for silicate melt used in mineral fiber production. *Advanced Materials Research*. 2014. No. 880. Pp. 233–236.
8. *Volokitin O.G., Timonov E.V., Volokitin G.G., Nikiforov A.A., Chibirkov V.K.* Plazmennaya ustanovka dlya polucheniya tugoplavkogo silikatnogo raspava [Plasma apparatus for the production of refractory silicate melt]. RF Patent N 2503628. 2014.
9. *Volokitin G.G., Skripnikova N.K., Volokitin O.G., Shekhovtsov V.V.* Elektrodugovye i elektroplazmennye ustroistva dlya pererabotki silikatsoderzhashchikh otkhodov [Arc-jet and electroplasma units for recycling silicate-based waste]. *Russian Physics Journal*. 2014. No. 3/3. Pp. 114–119. (rus)