

УДК 631.365

*ВОЛОКИТИН ОЛЕГ ГЕННАДЬЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент,
volokitin_oleg@mail.ru
ШЕХОВЦОВ ВАЛЕНТИН ВАЛЕРЬЕВИЧ, аспирант,
shehovcov2010@yandex.ru
Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

ПРОЦЕССЫ ПОЛУЧЕНИЯ СИЛИКАТНЫХ РАСПЛАВОВ И МАТЕРИАЛОВ НА ИХ ОСНОВЕ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ

Приведены результаты анализа процессов получения силикатных расплавов в условиях низкотемпературной плазмы. В качестве исходных материалов для получения расплавов были выбраны материалы с различным содержанием оксида кремния, их выбор обусловлен содержанием в химическом составе кремнезема от 50 до 100 % и пригодностью для практического использования. Определен химический состав исследуемого сырья. Произведен расчет времени плавления частицы кварца в условиях низкотемпературной плазмы. При объемной скорости плазменного потока $W = 0,65$ л/с полностью расплавляются частицы размером 1,28 мм. Расчеты для $W = 1,4$ л/с показали возможность полного расплавления частиц размером 0,88 мм до попадания на дно установки, частицы большего размера успевают расплавиться частично.

Ключевые слова: силикатный расплав; низкотемпературная плазма; математическая модель; процессы плавления; плазмохимический реактор.

*OLEG G.VOLOKITIN, PhD, A/Professor,
volokitin_oleg@mail.ru
VALENTIN V. SHEKHOVTSOV, Research Assistant,
shehovcov2010@yandex.ru
Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

SILICATE MELTS AND MATERIALS PRODUCED THEREFROM USING LOW-TEMPERATURE PLASMA

The paper presents the analysis silicate melt production using the low-temperature plasma. The materials with different content of silicon oxide are selected for silicate melt production due to their content in the chemical composition of silica ranging from 50 to 100 % and relevance for practical use. The chemical composition of silicate melt is determined in the paper. The melting time is calculated for quartz particles under the conditions of low-temperature plasma. It is shown that at 0,65 l/s bulk speed of plasma flow the particles having 1,28 mm size completely melt. Also, it is found that at 1,4 l/s bulk speed of plasma flow the particles with 0,88 mm size completely melt before they reach the bottom of plasma generator, while larger particles melt partially.

Keywords: silicate melt; low-temperature plasma; mathematical model; melting processes; plasma-chemical reactor.

В настоящее время получение однородного по температуре и составу силикатного расплава из сырьевых материалов, имеющих температуру плавления

более 1500 °С, с использованием традиционных технологий не представляется возможным. Актуальной является разработка способов получения силикатных расплавов с использованием энергии низкотемпературной плазмы [1]. При этом процесс плавления силикатных смесей позволит значительно снизить энергетические затраты и вредные выбросы в атмосферу. Системное решение научных и практических задач, связанных с получением расплавов для создания силикатных материалов различного назначения, установлением режимов работы генератора низкотемпературной плазмы, обеспечивающих получение высокотемпературных силикатных расплавов из сырья с различным содержанием оксида кремния и достижением необходимой однородности конечного продукта, является определяющим в решении рассматриваемой проблемы.

В качестве исходных материалов для получения расплавов были выбраны материалы с различным содержанием оксида кремния, их выбор обусловлен содержанием в химическом составе кремнезема от 50 до 100 % и пригодностью для практического использования. В табл. 1 представлен химический состав основных сырьевых материалов, исследуемых в работе. К материалам природного происхождения относятся базальтовая порода, кварц-полевошпат-содержащее сырье и кварцевый песок. В качестве техногенного сырья использовались золы и продукты сжигания сланцев.

Таблица 1

Химический состав сырьевых компонентов

Сырьевые материалы	Содержание оксидов, масс. %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O	Δm _{пр}
Базальтовая порода	50,40	16,17	7,24	8,98	4,37	8,14	4,70
Зола ТЭЦ	51,16	35,07	3,62	8,33	0,91	0,23	0,68
Продукты сжигания сланцев	61,59	23,36	7,91	1,60	1,27	1,34	2,93
Кварц-полевошпат-содержащее сырье	62,05	15,94	4,18	4,72	2,01	8,4	2,7
Кварцевый песок Туганского месторождения	98,15	0,67	0,12	0,07	0,05	0,01	0,93
Кварц Чупинского месторождения	99,96	Следы	–	Следы	Следы	0,03	–

Из данных, представленных в табл. 1, следует, что все используемые сырьевые материалы содержат более 50 % SiO₂, который является основным стеклообразователем. Модуль кислотности используемых техногенных отходов значительно выше модуля кислотности традиционного силикатного сырья (табл. 2). Высокий модуль кислотности положительно влияет на химическую и термическую стойкость готовых изделий. С уменьшением модуля кислотности возрастает склонность к кристаллизации – долговечность уменьшается

[2, 3]. Предельное содержание оксида кремния туганского песка составляет 98,15 масс. %, т. е. отсеvy песка являются высококремнеземистым продуктом с достаточно низким содержанием примесей.

Таблица 2

Характеристики силикатных расплавов [4]

Сырьевые материалы	Содержание оксидов, масс. %			M_K	M_B
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SiO ₂ + Al ₂ O ₃		
Базальтовая порода	50,40	16,17	66,57	5,39	2,48
Зола ТЭЦ	51,16	35,07	86,23	9,33	5,23
Продукты сжигания сланцев	61,59	23,36	84,95	29,60	4,55
Кварц-полевошпатсодержащее сырье	62,05	15,94	77,99	11,59	5,17
Кварцевый песок Туганского месторождения	98,15	0,67	98,82	823,5	274,5
$M_K = \frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{CaO} + \text{MgO}} - \text{модуль кислотности}$ $M_B = \frac{\text{SiO}_2 + 2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3}{2 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + 2 \cdot \text{K}_2\text{O} + 2 \cdot \text{Na}_2\text{O}} - \text{модуль вязкости}$					

Для определения границ дисперсности порошка, подаваемого в плазменный реактор, проведен расчет времени плавления частиц кварца радиусом от 0,001 до 1 мм при нахождении их в потоке низкотемпературной плазмы и при попадании в силикатный расплав. Аналитическое решение поставленной задачи сводится к тому, что при нагреве частицы кварца до температуры плавления изменение температуры происходит только за счет электрического нагрева и теплообмена с окружающей средой:

$$c_{ch} \rho_{ch} V_{ch} \frac{dT_{ch}}{dt} = \alpha S_{ch} (T_{sr} - T_{ch}) + Q_{el},$$

где t – время; T – температура; c – удельная теплоемкость; ρ – плотность; α – коэффициент теплообмена; S_{ch} – площадь поверхности частицы; V_{ch} – объем частицы; Q_{el} – теплоприход от электрического нагрева.

На первом этапе плавление частицы кварца происходит в потоке низкотемпературной плазмы, представляющем собой цилиндрическую трубку радиусом r , протяженностью L (рис. 1). Из плазмотрона со стационарной объемной скоростью W выходит поток нагретого газа (плазма), который прогревает частицы до температуры плавления, а после расплавления нагревает получившийся расплав до стационарной температуры [5, 6]. После заполнения объема установки расплавом частицы кварца попадают сразу в расплав и нагреваются за счет теплообмена с расплавом. При расчетах времени плавления частиц в условиях низкотемпературной плазмы целью являлось опреде-

ление возможности расплавления частицы кварца за время движения до дна установки (высота падения частиц $h \sim 100$ мм). Качественный вид изменения температуры частицы во времени от момента начала нагрева до момента полного расплавления для $r = 1$ мм представлен на рис. 2.

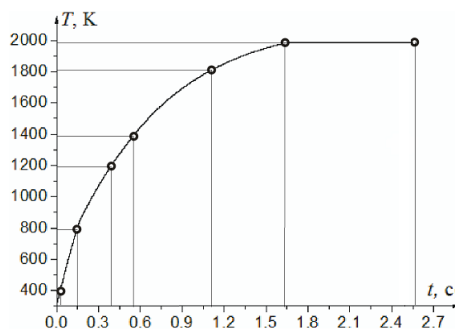
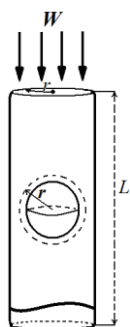


Рис. 1. Схема плазменного воздействия
Рис. 2. Изменение температуры частицы во времени, $r = 1$ мм

Расчеты показали [7], что при объемной скорости плазменного потока $W = 0,65$ л/с полностью расплавляются частицы размером 1,28 мм. Расчеты для $W = 1,4$ л/с показали возможность полного расплавления частиц размером 0,88 мм до попадания на дно установки, частицы большего размера успевают расплавиться частично. После заполнения установки высокотемпературным силикатным расплавом подаваемые в плавильную печь частицы кварца сразу попадают в расплав. Проведенные расчеты позволили установить зависимость времени полного расплавления частицы кварца, находящейся в высокотемпературном силикатном расплаве, от ее радиуса. Результаты расчета представлены в табл. 3.

Таблица 3

Зависимость времени плавления t от радиуса частицы, находящейся в силикатном расплаве

Размер частиц, мм	0,002	0,004	0,02	0,04	0,2	0,4	2
t , с	$2,6 \cdot 10^{-6}$	10^{-5}	$2,6 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}	$2,6 \cdot 10^{-2}$	0,1	2,61

Выделение джоулева тепла при прохождении электрического тока происходит в расплаве (в жидкой фазе). Расчетами установлено, что электрический ток слабо влияет на скорость разогрева частиц до температуры плавления. Однако после начала плавления расплавленный слой вокруг кристаллической частицы быстро догревается до средней температуры расплава за счет электрического тока и в связи с этим ускоряет процесс плавления [8].

В результате проведенных исследований установлена возможность получения силикатных расплавов из сырьевых материалов с различным содержанием кремнезема в плазмохимическом реакторе. Определен химический состав для каждого исследуемого сырьевого материала. Расчетным путем

установлено время расплавления частицы кварца в потоке плазмы и при падении ее в силикатный расплав.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Fabrication of magnesium aluminum silicate glass ceramics by sintering route* / S.K. Durrani, M.A. Hussain, S.Z. Hussain, J. Akhtar, A. Saeed, N. Hussain, N. Ahmed // *Materials Science-Poland*. – 2010. – № 28. – 459 p.
2. Капитонов, А.М. Физико-механические свойства композиционных материалов / А.М. Капитонов, В.Е. Редькин. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2013. – 532 с.
3. Волокитин, О.Г. Особенности физико-химических процессов получения высокотемпературных силикатных расплавов / О.Г. Волокитин, В.И. Верещагин // *Известия вузов. Химия и химическая технология*. – 2013. – Т. 56. – № 8. – С. 71–76.
4. Каминская, А.Ю. Химия и технология минерального волокна / А.Ю. Каминская // *Российский химический журнал. Химия современных строительных материалов*. – 2003. – Т. XLVII. – № 4. – С. 32–38.
5. Martyushev, S.G. Conjugate natural convection combined with surface thermal radiation in a three-dimensional enclosure with a heat source / S.G. Martyushev, M.A. Sheremet // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2014. – V. 73. – P. 340–353.
6. Sheremet, M.A. Laminar natural convection in an inclined cylindrical enclosure having finite thickness walls / M.A. Sheremet // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2012. – V. 55. – P. 3582–3600.
7. *Calculation of the melting process of a quartz particle under low-temperature plasma conditions* / V.A. Vlasov, O.G. Volokitin, G.G. Volokitin, N.K. Skripnikova, V.V. Shekhovtsov // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2016. – January. – V. 89. – № 1.
8. Волокитин, О.Г. Расчет времени расплавления частицы кварца в высокотемпературном силикатном расплаве / О.Г. Волокитин, В.В. Шеховцов // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. – 2015. – № 3. – С. 159–162.

REFERENCES

1. Durrani S.K., Hussain M.A., Hussain S.Z., Akhtar J., Saeed A., Hussain N., Ahmed N. Fabrication of magnesium aluminum silicate glass ceramics by sintering route. *Materials Science-Poland*. 2010. No. 28. 459 p.
2. Kapitonov A.M., Red'kin V.Ye. Fiziko-mekhanicheskiye svoystva kompozitsionnykh materialov [Physical and mechanical properties of composite materials]. Krasnoyarsk: SibFU Publ., 2013. 532 p. (rus)
3. Volokitin O.G., Vereshchagin V.I. Osobennosti fiziko-khimicheskikh protsessov polucheniya vysokotemperaturnykh silikatnykh rasplavov [Physicochemical processes in high-temperature silicate melt production]. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [News of Higher Educational Institutions. Chemistry and Chemical Technology]. 2013. V. 56. No. 8. Pp. 71–76. (rus)
4. Kaminskaya A.Yu. Khimiya i tekhnologiya mineral'nogo volokna [Chemistry and technology of mineral fiber]. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal* [Mendeleev Chemistry Journal]. 2003. No. 4. Pp. 32–38. (rus)
5. Martyushev S.G., Sheremet M.A. Conjugate natural convection combined with surface thermal radiation in a three-dimensional enclosure with a heat source. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014. V. 73. Pp. 340–353.
6. Sheremet M.A. Laminar natural convection in an inclined cylindrical enclosure having finite thickness walls. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2012. V. 55. Pp. 3582–3600.
7. Vlasov V.A., Volokitin O.G., Volokitin G.G., Skripnikova N.K., Shekhovtsov V.V. Calculation of the melting process of a quartz particle under low-temperature plasma conditions. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2016. V. 89. No. 1.
8. Volokitin O.G., Shekhovtsov V.V. Raschet vremeni rasplavljeniya chastitsy kvartsa v vysokotemperaturnom silikatnom rasplave [Time-of-melting calculation for quartz particle in high temperature melt]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015. No. 3. Pp. 159–162 (rus)