

При одновременном снижении дозировки шихты и мощности, подводимой к индук-

тору, в соответствии с уравнениями (8) и (11) получено:

$$\delta T_p = \left[ \frac{(C_p T_p^0 - C_{ш} T_{ш}^0)}{G_{ш}^0 C_p + K_n + \alpha} \delta G_{ш}^0 - \frac{\delta N_g^0}{G_{ш}^0 C_p + K_n + \alpha} \right] \left[ 1 - \exp\left(-\frac{G_{ш}^0 C_p + K_n + \alpha}{V_p \gamma_p C_p}\right) \right]. \quad (14)$$

Из (14) вычислено установившееся значение  $\delta T_{\delta}^* = -97$  градусам. Время переходного процесса остается тем же и составляет примерно три постоянных времени канала. Экспериментальные данные дают результат уменьшения температуры расплава на  $(95 \pm 5)$  градусов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенное математическое описание процесса плавления базальтовой шихты в индукционном тигле позволяет дать количественные оценки влияния отдельных параметров на температуру расплава и выходную температуру охлаждающей воды и может использоваться при выборе и уточнении оптимальных режимов работы индукционной печи и настроечных коэффициентов высокочастотного генератора.

УДК 691.618.93

## ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПЕНОСИЛИКАТА НА ОСНОВЕ БАЗАЛЬТОВОЙ ЧЕШУИ

Н.Н. Ходакова, О.С. Татаринцева

*Представлены результаты экспериментальных исследований по созданию экологически чистого теплоизоляционного ячеистого материала с использованием в качестве основного наполнителя базальтовой чешуи. Подобраны режимы термического вспучивания гранулята, и определено необходимое содержание в нем влаги для получения мелкоячеистой структуры. Показано, что введение в жидкостекольную композицию тонкодисперсного карбоната кальция и ступенчатый режим термообработки приводят к значительному повышению водостойкости образцов.*

*Ключевые слова: пеносиликат, жидкостекольная композиция, базальтовая чешуя, микрокальцит, гранулят, вспучивание, термообработка.*

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время строительная индустрия проявляет большой интерес именно к экологически чистым, негорючим и высокоэффективным теплоизоляционным материалам, среди которых последнее место занимают пеносиликаты, имеющие жесткую ячеистую

структуру, достаточно низкую плотность и теплопроводность, температуру эксплуатации до 400-450 °С. Пеносиликаты не горят и не поддерживают горение. В случае превышения температуры эксплуатации материал оплавляется, не выделяя в окружающую среду вредные вещества.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров Ю. Б., Ратников Д. Г. Холодные тигли. – М.: Металлургия, 1972. – 112 с.
2. Х. Квакернаак, Р. Сиван. Оптимальные системы управления. – М.: Мир, 1977. – 650 с.
3. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учебное пособие для вузов. – Л.: Химия, 1987. – 576.

**Татаринцева Ольга Сергеевна**, д-р техн. наук, доцент, зав. лабораторией материаловедения минерального сырья Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), labmineral@mail.ru, 659322, Алтайский край, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1, 659322, Алтайский край, г. Бийск, ул. Декабристов, д. 10/1, кв. 36, тел. (3854) 30-58-82.

Наиболее востребованы на строительном рынке изделия из пеносиликатов с объемной массой в пределах 230-270 кг/м<sup>3</sup>, обладающие оптимальным комплексом физико-механических и теплофизических свойств.

В качестве вяжущего при изготовлении пеносиликатов обычно применяют водные растворы щелочных металлов, характеризующиеся формулой  $R_2O \cdot nSiO_2$  (натриевое или калиевое жидкое стекло).

Жидкое стекло, являющееся типичной нанодисперсной системой, благодаря особенностям своего строения и высокой дисперсности твердой фазы обладает уникальной способностью образовывать при нагреве твердую неорганическую пену. Проводя процесс вспенивания жидкого стекла в формах с замкнутым объемом, можно получать изделия с заданной формой и размерами [1]. За кажущейся внешней простотой этого процесса скрываются весьма сложные проблемы технологического характера, обусловленные, прежде всего, высоким влагосодержанием жидкого стекла. Чтобы осуществить процесс поризации, необходимо удалить из него практически всю свободную воду и оставить лишь структурную, которая при нагреве выше 105 °С сначала разжижает ксерогель, образовавшийся после удаления свободной воды, переводя его в пиропластичное состояние, а при дальнейшем нагревании, переходя в парообразное состояние, формирует дисперсную фазу системы в виде мелких сферических пузырьков, разделенных межпоровыми перегородками твердой дисперсионной среды.

Уменьшить влияние свободной воды можно введением в жидкое стекло минеральных наполнителей, вызывающих развитие процесса гелеобразования и превращения жидкой исходной смеси в твердообразную, способную к грануляции.

Наполнителями для жидкостекольных композиций служат как природные минеральные вещества (трепел, диатомит, опока, маршаллит и др.), так и техногенные отходы (золы-уноса, алюмосиликатные сферы) [2, 3], придающие необходимые эксплуатационные свойства изделиям. Их присутствие увеличивает долю твердой фазы в жидкостекольной композиции, что способствует равномерному распределению жидкой фазы по объему и стабилизирует процесс удаления воды. Вводимые наполнители должны быть нейтральными по отношению к жидкому стеклу, не вступать с ним в химическую реакцию при обычных температурах и обладать определенной дисперс-

ностью. Чем выше удельная поверхность наполнителя, тем меньше его требуется.

Известно также, что положительный эффект по стабилизации процесса поризации дает модификация жидкостекольной композиции так называемым «сухим стеклом» в виде измельченной до частиц менее 63 мкм силикат-глыбы.

Правильно выбранный наполнитель является залогом получения материала с заданными свойствами.

Исходя из этого, в настоящей работе рассмотрена возможность создания пеносиликата с улучшенными эксплуатационными свойствами с использованием нового перспективного наполнителя – базальтовой чешуи (БЧ). Такой выбор обусловлен сочетанием ее уникальных свойств – высокой твердостью, прочностью, химической и термической стойкостью.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Согласно литературным данным, пеносиликаты получают из гранулята (жидкостная и механическая грануляция) [4, 5] или по технологии изготовления пеностекла [6, 7]. Последний способ позволяет изготавливать отличный материал, похожий по свойствам на пеностекло, но затраты на его производство из-за высокой температуры и длительного отпуска изделия для ликвидации напряженного состояния материала так же велики, как и на изготовление пеностекла. Получение пеносиликата из гранулята имеет свои положительные стороны: грануляция исключает расслоение массы и выпадение отдельных фаз в осадок, однако при использовании жидкостной грануляции возникает необходимость утилизации значительного количества жидкости с предварительной ее очисткой, что повышает стоимость изделия. Поэтому наиболее предпочтителен способ механической грануляции, обеспечивающий равномерность распределения компонентов по объему изделия, который и был выбран для проведения исследований.

Процесс изготовления лабораторных образцов включал в себя приготовление жидкостекольной композиции, грануляцию, сушку гранул и термическую поризацию (вспучивание).

Жидкостекольные композиции готовили смешением натриевого жидкого стекла с силикатным модулем 3, влагосодержанием 55 % масс., плотностью 1500 кг/м<sup>3</sup> и базальтовой чешуи с подогревом смеси до 90 °С. В нагретую смесь вводили концентрат сухого стекла с перемешиванием в течение 5-10 мин до загу-

щения реакционной массы, которое позволяло ее гранулировать. Изготовленными вручную и подсушенными при  $T = 70-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  до определенной влажности гранулами заполняли металлическую пресс-форму с замкнутым объемом, предварительно обработанную антиадгезивом.

Количество материала, необходимое для получения изделия с заданной плотностью, рассчитывали по формуле:

$$m = \rho V(1 + W),$$

где  $m$  – масса гранул, г;  $\rho$  – заданная плотность, г/см<sup>3</sup>;  $V$  – внутренний объем формы, см<sup>3</sup>;  $W$  – абсолютная влажность гранул, отн. ед.

Вспучивание проводили в муфельной печи при разных температурно-временных режимах.

Используемая в настоящей работе базальтовая чешуя представляет собой чешуйки стекла толщиной 1-5 мкм и длиной 15-600 мкм (рисунок 1) и имеет насыпную плотность 140 кг/м<sup>3</sup>.

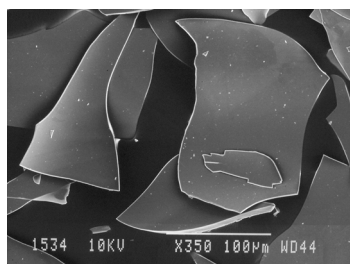


Рисунок 1 – Микрофотография базальтовой чешуи

Низкое значение насыпной плотности является основанием для ее использования при изготовлении легких теплоизоляционных материалов. При истинной плотности чешуи 2500 кг/м<sup>3</sup> свободно насыпанный ее слой в одном кубометре содержит 40 дм<sup>3</sup> твердой фазы и 960 дм<sup>3</sup> газообразной, т.е. пористость этого слоя составляет 96 %. Устойчивость такого слоя обусловлена большим потенциалом заряда частиц, который способствует их хаотичной ориентации в объеме. При увлажнении БЧ водой, присутствующей в жидком стекле, происходит сток электрического заряда, и все чешуйки укладываются параллельно в горизонтальной плоскости, обеспечивая формирование равномерной и достаточно прочной пористой структуры композита (рисунок 2).

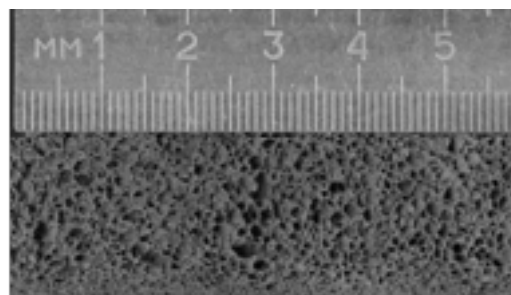


Рисунок 2 – Макроструктура пеносиликата с базальтовой чешуей

С увеличением содержания базальтовой чешуи возрастают плотность  $\rho$  и, соответственно, прочность при сжатии  $\sigma_{сж}$  пеносиликата (рисунок 3). При этом также линейно повышается коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , зависящий от плотности.

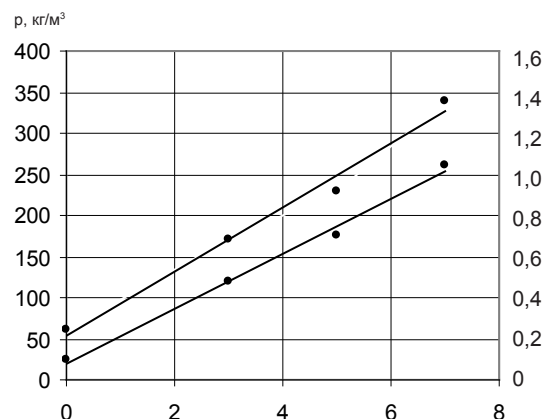


Рисунок 3 – Зависимость плотности (1) и прочности (2) образцов от содержания БЧ

Однако, как выяснилось в ходе экспериментов, раствор жидкого стекла при контакте с чешуйками нейтрализует их заряд, вследствие чего смесь расслаивается, и чешуйки выпадают в осадок. Исключить процесс седиментации увеличением содержания наполнителя не представилось возможным, так как при введении более 7 % масс. базальтовой чешуи в жидкое стекло трудно получить однородную массу, а через некоторое время, в результате практически полного разрушения гидросиликата натрия, в ней происходит водоотделение. При нагреве такой смеси вместо поризации наблюдается ее уплотнение, которое можно объяснить появлением в смеси оксида натрия, вступающего во взаимодействие с оксидами металлов, присутствующими в химическом составе чешуи.

Проблему седиментации решали введением дополнительного минерального наполнителя – микрокальцита, изготовленного измельчением мраморных отходов.

Для обеспечения технологичности изготавливаемых смесей наполнители, как правило, вводятся в жидкое стекло в тонкодисперсном виде, обуславливающим большой избыток свободной поверхностной энергии. Нейтрализация этой энергии происходит за счет адсорбционного связывания воды в жидком стекле и ионного обмена, стимулирующего протекание химических реакций на границе раздела фаз. Средний диаметр частиц выбранного наполнителя, рассчитанный по результатам оценки его удельной поверхности методом тепловой десорбции аргона, составил 2,5 мкм.

Результаты исследований показали, что оптимальные прочностные и теплофизические свойства реализуются на композиции с 6 % масс. БЧ и 12 % масс. микрокальцита (таблица 1).

Таблица 1 – Состав композиций и характеристики образцов

Наименование компонента, показателя	Содержание компонента, % масс., значение показателя		
	№ 1	№ 2	№ 3
Жидкое стекло	89,5	88,0	76,0
Базальтовая чешуя	4,5	6,0	6,0
Микрокальцит	–	–	12,0
Сухое стекло	6,0	6,0	6,0
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	210	270	270
$\sigma_{сж}$ , МПа	0,62	0,94	1,00
$\lambda$ , Вт/(м·К)	0,059	0,078	0,080

Определение необходимой для термического вспучивания абсолютной влажности гранул проводили, варьируя содержание воды от 15 % до 50 % масс. При низком влагосодержании (15-20 % масс.) гранулят обладает слабой поризационной способностью и не занимает полностью форму для вспучивания, вследствие чего поверхность образца может быть неровной, а плотность, как правило, завышенной (300-350 кг/м<sup>3</sup>). При большем содержании влаги (40-50 % масс.) готовый образец при низкой объемной массе (90-150 кг/м<sup>3</sup>) имеет довольно прочный каркас, но под его плотной

корочкой могут образовываться крупные поры и даже полости (рисунок 4).

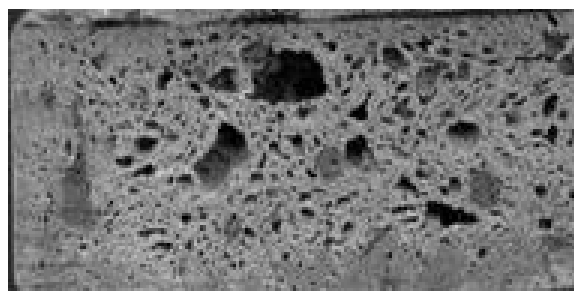


Рисунок 4 – Внутренняя структура пеносиликата, изготовленного из гранул с высоким влагосодержанием

Для обеспечения равномерной мелкопористой структуры пеносиликата оптимальное количество воды (свободной и конституционной) в грануляте должно составлять 30-35 % масс. Плотность изготовленных из него образцов находится в интервале от 230 до 270 кг/м<sup>3</sup>.

Исследования показали, что структура пеносиликата в значительной степени определяется также размером гранул: мелкие поры, равномерно распределенные в объеме изделия, образуются при использовании гранул диаметром 3-5 мм.

Влага – один из факторов, отрицательно сказывающийся на эксплуатационных характеристиках утеплителей и, в первую очередь, на теплопроводности.

Исследование водопоглощения пеносиликата (при полном погружении образцов в воду) показало, что введение микрокальцита приводит к существенному его снижению (рисунок 5).

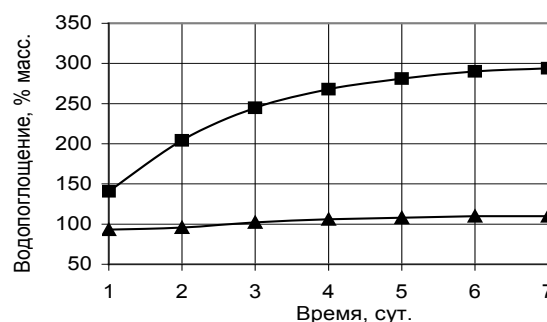


Рисунок 5 – Водопоглощение образцов пеносиликата, изготовленных из композиций № 2 (■); № 3 (▲)

В ходе экспериментов было установлено, что на водостойкость образцов значительно



влияет и температура обработки. Образцы, изготовленные при температуре 150 °С, после выдержки в воде в течение 2-3 суток начинают рассыпаться на части, в то время как образцы, термически вспученные при 450 °С, после нахождения в воде в течение 6 суток сохраняют свою форму и размеры, т.е. высокотемпературная обработка дает более стойкую к воде модификацию пеносиликата.

При термической поризации с повышением температуры увеличивается растворимость карбоната кальция, в результате чего образуются твердые растворы замещения, происходит кристаллизация щелочноземельных силикатов, приводящая к повышению кристалличности межпоровых перегородок и к увеличению их химической стойкости и прочности. Однако при высокотемпературной обработке вследствие интенсивного выделения влаги внутри образца часто образуются довольно крупные пустоты. Поэтому более предпочтителен ступенчатый режим обработки, при котором при  $T = 110-200$  °С масса вспучивается, а затем при увеличении температуры до 450 °С закрепляется высокотемпературная структура пеносиликата, повышающая его водостойкость.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, введение в состав жидкого стекла базальтовой чешуи способствует за счет дисперсного армирования и организации более равномерной пористой структуры увеличению прочности пеносиликата. Использование дополнительного карбонатного наполнителя обеспечивает повышение водостойкости изделий в 3 раза.

Наиболее качественные мелкопористые образцы пеносиликата с плотностью до 270 кг/м<sup>3</sup> можно получить из мелких гранул с влажностью 30-36 % обработкой их по двухступенчатому режиму: 1,5-2 ч при  $T = 110-200$  °С; 40-60 мин при  $T = 450$  °С.

Изделия из созданного пеносиликата, обладавая прочностью на сжатие 0,96-1,0 МПа и имея коэффициент теплопроводности 0,078-0,080 Вт/(м·К), могут использоваться в качестве эффективной, экологически безопасной теплоизоляции.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лотов В.А. Нанодисперсные системы в технологии строительных материалов и изделий // *Стекло и керамика*. – 2006. – № 8. – С. 2–4.
2. Казьмина О.В., Верещагин В.И., Абияк А.Н. Использование кремнеземсодержащего сырья для производства пеностеклокристаллических материалов // *Сб. докладов VII Всероссийской научно-практической конференции «Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья»*, 22–24 мая 2007 г., г. Белокуриха. – Бийск: БТИ АлтГТУ, 2007. – С. 59–60.
3. Волокитин Г.Г., Скрипникова Н.К., Аниканова Л.А. и др. Пеносиликатные материалы из минерального сырья и техногенных отходов // *Сб. докладов VII Всероссийской научно-практической конференции «Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья»*, 22–24 мая 2007 г., г. Белокуриха. – Бийск: БТИ АлтГТУ, 2007. – С. 73–76.
4. Лотов В.А., Кутугин В.А., Фоменкова К.П. Влияние некоторых параметров на поризационную способность жидкостекольных композиций // *Сб. докладов VII Всероссийской научно-практической конференции «Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья»*, 22–24 мая 2007 г., г. Белокуриха. – Бийск: БТИ АлтГТУ, 2007. – С. 76–79.
5. Китайцев В.А. Технология теплоизоляционных и акустических материалов. – М: Изд-во литературы по строительству, 1970. – 382 с.
6. Демидович Б.К. Производство и применение пеностекла. – Минск: Наука и техника, 1972. – 301 с.
7. Дамдинова Д.Р., Хардаев П.К., Карпов Б.А., Зонхийев М.М. Технологические приемы получения пеностекла с регулируемой поровой структурой // *Строительные материалы*. – 2007. – № 3. – С. 68–69.

**Ходакова Наталья Николаевна**, старший научный сотрудник лаборатории материаловедения минерального сырья Федерального государственного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), 659322, Алтайский край, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1, тел. 30-59-06, labmineral@mail.ru.

**Татаринцева Ольга Сергеевна**, д-р техн. наук, доцент, зав. лабораторией материаловедения минерального сырья Федерального государственного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), 659322, Алтайский край, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1, тел. 30-58-82, labmineral@mail.ru.