

ПРОДУКТЫ ГИДРАТАЦИИ МАГНЕЗИАЛЬНОГО ЦЕМЕНТА, МОДИФИЦИРОВАННОГО ДОБАВКОЙ АМОРФНОГО КРЕМНЕЗЕМА

***В. В. Тюкавкина, А. Г. Касиков, Б. И. Гуревич, В. В. Семушин,
Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья
им. И. В. Тананаева Кольского научного центра РАН,
Мурманская обл., г. Апатиты***

Ключевые слова: магнезиальные вяжущие, аморфный кремнезем, прочность, водостойкость, гидратация, фазовый состав

Key words: magnesia binders, amorphous silica, strength, water resistance, hydration, phase composition

Твердение магнезиального оксихлоридного цемента обусловлено протеканием химической реакции между MgO и раствором $MgCl_2$. Общие принципы твердения магнезиальных цементов рассматривались в многочисленных публикациях [1–8], согласно которым структура магнезиального камня формируется в основном пента- и триоксигидрохлоридом магния, а также гидроксидом магния. Однако содержащиеся в этих работах данные о самом вяжущем и продуктах его твердения весьма противоречивы. Так, в работе [4] указывается, что при затворении MgO концентрированным раствором $MgCl_2$ первоначально кристаллизуется неустойчивое метастабильное соединение $5MgO \cdot MgCl_2 \cdot 13H_2O$, которое постепенно переходит в конечную устойчивую фазу $3MgO \cdot MgCl_2 \cdot 11H_2O$. Между тем авторы работы [8] полагают, что главной и наиболее стабильной составляющей магнезиального камня, обеспечивающей его прочность и стойкость к растрескиванию, является фаза $5MgO \cdot MgCl_2 \cdot 13H_2O$, в то время как $3MgO \cdot MgCl_2 \cdot 11H_2O$ представляет собой метастабильную составляющую магнезиального камня, содержание которой можно регулировать изменением активности MgO и концентрации затворителя. Содержание гидроксида магния в магнезиальном камне находится в прямой зависимости как от активности вяжущего, так и от концентрации затворителя. Впрочем, как утверждается в работе [7], фазы $3MgO \cdot MgCl_2 \cdot 11H_2O$ и $5MgO \cdot MgCl_2 \cdot 13H_2O$ имеют идентичную кристаллическую структуру и близкие энергетические параметры, а следовательно, и их физические свойства, по всей вероятности, также близки.

Широкое применение магнезиальных вяжущих в строительном производстве ограничено ввиду их низкой водостойкости. Использование ультрадисперсных добавок позволяет получать строительные материалы с повышенными конструктивными и технико-эксплуатационными характеристиками. Наиболее широкое распространение в производстве строительных материалов получил диоксид кремния [8–13]. Установлено, что коллоидный кремнезем способствует формированию более плотной структуры магнезиального вяжущего [12]. По мнению авторов работ [11, 13], присутствие порошкообразного аморфного диоксида кремния обеспечивает формирование водостойких гидросиликатов магния.

Проведенными ранее исследованиями выявлено, что введение в состав магнезиального вяжущего растворов солянокислотного выщелачивания шлака, состоящих из геля кремниевой кислоты и сульфатов железа и магния, способствует формированию в цементном камне триоксигидрохлорида магния [14]. На основе каустического магнезита, хлорида или сульфата магния и раствора соляно- или сернокислотного выщелачивания отвального магнезиально-железистого шлака разработано магнезиальное вяжущее, отличающееся повышенной водостойкостью (коэффициент размягчения 0,88–1,06) при сохранении достаточно высокой прочности и отсутствии склонности к растрескиванию [15]. Использование порошков аморфного кремнезема в составе композиции на основе каустического магнезита и раствора хлористого магния обеспечивает повышение водостойкости затвердевшего камня [16].

Поскольку единое мнение о фазовом составе и характере твердения магнезиальных вяжущих отсутствует, изучение состава продуктов твердения магнезиальных смесей и механизма их образования по-прежнему актуально. В данной работе исследовано влияние добавки тонкодисперсного диоксида кремния на процессы твердения и фазовый состав магнезиального оксихлоридного вяжущего.

В качестве добавки, обеспечивающей получение водостойкого магнезиального вяжущего, применяли порошок аморфного диоксида кремния, представляющий собой продукт сернокислотного выщелачивания магнезиально-железистого шлака. При обработке

отвальных шлаков медно-никелевого производства растворами серной кислоты были получены растворы, содержащие одновременно сульфаты железа и магния, а также золь кремниевой кислоты. Процесс образования диоксида кремния состоял из двух стадий – сначала гелеобразование, а затем обезвоживание геля при температуре 40–50 °С. В результате получали смесь аморфного диоксида кремния и сульфата железа (II). Для удаления сульфата полученный продукт промывали и вновь высушивали до постоянной массы. Ранее данным способом в зависимости от условий и дисперсности шлака были получены порошки с удельной поверхностью 193–710 м²/г [16]. В настоящей работе использовали порошок кремнезема с удельной поверхностью 385 м²/г, при этом объем пор составлял 0,1701 см³/г, диаметр пор – 2,89 нм, глубина пор – 2,58 нм (измерения проводили методом тепловой десорбции азота на установке TriStar II 3020). Порошок кремнезема светлого цвета имел аморфную структуру, содержал 91,7 мас. % SiO₂ и 2,41 мас. % Fe₂O₃; потери кристаллизационной воды, по данным ДТА, составляли 5,73 мас. %. Вяжущим служил порошок магнезитовый каустический (ПМК) ОАО «Комбинат Магнезит» (Челябинская обл., г. Сатка) следующего химического состава (в мас. %): MgO 82,9, CaO 1,23, SiO₂ 0,9, Fe₂O₃ 1,27, Al₂O₃ 0,29, п.п.п. 5,95. Магнезиальное вяжущее затворяли раствором хлористого магния плотностью 1,21 г/см³.

Для изучения процессов, происходящих при твердении оксихлоридного цемента, и состава продуктов твердения готовили образцы из цементного теста пластичной консистенции. Композицию на основе ПМК, раствора хлористого магния и порошка диоксида кремния готовили следующим образом. Первоначально смешивали расчетное количество раствора MgCl₂ и порошка SiO₂, а затем частями вводили ПМК. После перемешивания в лабораторном планетарном растворосмесителе до однородной консистенции формовали образцы размером 2х2х2 см, которые в течение 1 сут твердели на воздухе в формах; далее одна часть образцов твердела на воздухе, а другая – в воде. Через определенные промежутки времени образцы испытывали на прочность при сжатии. Затем из центра образца отбирали часть материала для дальнейших исследований.

Фазовый состав гидратированных материалов определяли с помощью рентгенофазового и дифференциально-термического методов анализа. Рентгенограммы снимали на приборе ДРОН-2 со скоростью 2 град/мин в диапазоне 2 Θ = 6–180°. Дифференциально-термический анализ проводили с использованием прибора ОД 102-568/с системы Ф. Паулик, И. Паулик, Л. Эрдеи. Структуру затвердевшего материала и состав фаз изучали при помощи сканирующего электронного микроскопа LEO 420 фирмы ZEISS (Германия), оснащенного энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 400 фирмы Oxford Instruments (Великобритания). Водостойкость (коэффициент размягчения) вяжущего оценивали по отношению прочности материала в возрасте 28 сут, насыщенного водой ($R_{сж. нас}$), к прочности сухого материала ($R_{сж. сух}$).

О влиянии содержания кремнезема на основные свойства магнезиального вяжущего можно судить по данным табл. 1. Введение в состав магнезиального вяжущего аморфного диоксида кремния способствует повышению водостойкости затвердевшего камня. Наибольший коэффициент размягчения магнезиального вяжущего характерен для составов с содержанием SiO₂ 5 мас. %. Прочность образцов, твердеющих на воздухе, при содержании SiO₂ до 3 мас. % повышается, а при дальнейшем увеличении его содержания снижается. После 1 сут твердения на воздухе часть образцов твердела в течение 27 сут в воде. При твердении в воде прочность образцов без добавки уменьшается с 35,5 МПа (1 сут) до 24 МПа, в то время как для образцов, содержащих более 1 мас. % SiO₂, наблюдается прирост прочности. Плотность затвердевшего материала с увеличением содержания SiO₂ уменьшается.

Исследование физико-химических процессов гидратации магнезиального вяжущего и продуктов его твердения свидетельствует о том, что изменение основных свойств вяжущего связано с различиями в фазовом составе и структуре продуктов твердения. По данным рентгенофазового анализа, в первые сутки твердения фазовый состав затвердевшего материала представлен новообразованной фазой 5MgO·MgCl₂·13H₂O. При дальнейшем твердении по мере изменения концентрации исходных веществ происходит перекристаллизация пентаоксигидрохлорида магния в триоксигидрохлорид магния. Этот процесс сопровождается выделением гидроксида магния. На рентгенограммах образцов, твердевших в течение 28 сут, помимо пентаоксигидрохлорида магния, присутствуют рефлексы, принадлежащие 3MgO·MgCl₂·11H₂O и Mg(OH)₂; при этом значительная часть MgO остается не прореагиро-

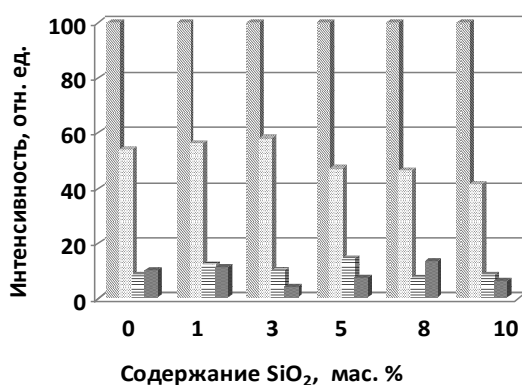
вавшей. С увеличением содержания диоксида кремния в составе вяжущего до 5 мас. % интенсивность рефлексов, принадлежащих $5\text{MgO}\cdot\text{MgCl}_2\cdot 13\text{H}_2\text{O}$ и $3\text{MgO}\cdot\text{MgCl}_2\cdot 11\text{H}_2\text{O}$, возрастает. Состав затвердевшего магниезального камня при твердении в воде характеризуется тем же набором фаз, что и при твердении на воздухе, однако их количественный состав существенно различается. Данные об изменении интенсивности рентгеновских максимумов продуктов твердения магниезального вяжущего в воде и на воздухе в зависимости от содержания кремнезема (рис. 1) показывают, что при твердении в воде интенсивность рентгеновских максимумов, принадлежащих $\text{Mg}(\text{OH})_2$, значительно возрастает. При твердении в воде каустический магнезит гидратируется, преимущественно с образованием брусита. Введение в состав магниезального вяжущего порошка кремнезема способствует формированию оксигидрохлоридов магния и уменьшению количества образующегося $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Наименьшее количество брусита образуется в образцах с добавкой 1–6 мас. % кремнезема. Повышенное содержание в магниезальном камне $\text{Mg}(\text{OH})_2$ вызывает снижение прочности и увеличение склонности к растрескиванию, а повышенное содержание триоксигидрохлорида магния обеспечивает увеличение коэффициента водостойкости.

Т а б л и ц а 1

Состав и свойства магниезального вяжущего, модифицированного добавкой тонкодисперсного диоксида кремния

Номер состава	Содержание компонентов, мас. %			Прочность при сжатии, МПа, после твердения				Коэффициент размягчения $\frac{R_{\text{сж.нас}}}{R_{\text{сж.сух}}}$	Плотность в возрасте 28 сут, г/см ³
	SiO ₂	ПМК	MgCl ₂	на воздухе			в воде (28 сут)		
				1 сут	28 сут	90 сут			
1	–	57	43	35,5	51,6	55,6	24,0	0,45	1,88
2	1	56,5	42,5	40,1	54,1	57,9	36,7	0,68	1,88
3	3	55	42	37,7	58,7	67,2	44,7	0,76	1,86
4	5	54	41	30,0	49,2	58,2	47,2	0,96	1,83
5	6	53	41	29,2	46,9	55,4	39,1	0,83	1,80
6	8	49	43	22,6	44,0	45,4	29,9	0,68	1,72
7	10	46	44	26,7	40,6	39,2	27,4	0,67	1,70

а)



б)

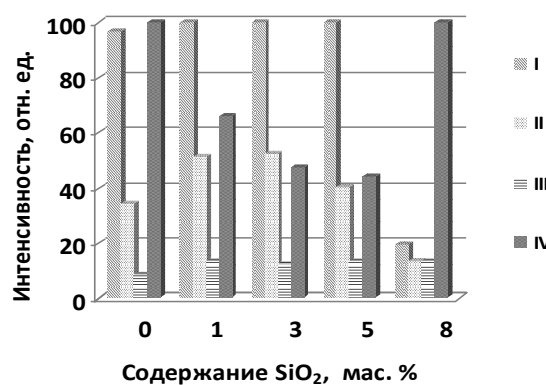


Рис. 1. Изменение интенсивности рефлексов рентгеновских максимумов продуктов твердения магниезального вяжущего в зависимости от содержания SiO₂ после 28 сут твердения образцов: а – на воздухе; б – в воде; I – MgO; II – $5\text{MgO}\cdot\text{MgCl}_2\cdot 13\text{H}_2\text{O}$; III – $3\text{MgO}\cdot\text{MgCl}_2\cdot 11\text{H}_2\text{O}$; IV – $\text{Mg}(\text{OH})_2$

В составе магниезального цемента, модифицированного добавкой кремнезема, наряду с основными продуктами твердения вяжущего обнаружено комплексное оксигидрохлоридное соединение магния и кремния переменного состава: $x\text{MgO}\cdot y\text{SiO}_2\cdot z\text{MgCl}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$, где $x = 0,3\text{--}1,7$, $y = 0,1\text{--}1,2$, $z = 1,2\text{--}3,8$, которое способствует повышению водостойкости. Установлено, что на образование новых соединений при гидратации каустического магнезита расходуется только часть оксида магния, другая часть играет роль наполнителя. К 90 сут твердения образцов на воздухе состав продуктов существенно не изменяется, 43–56 мас. % MgO остается не прореагировавшей.

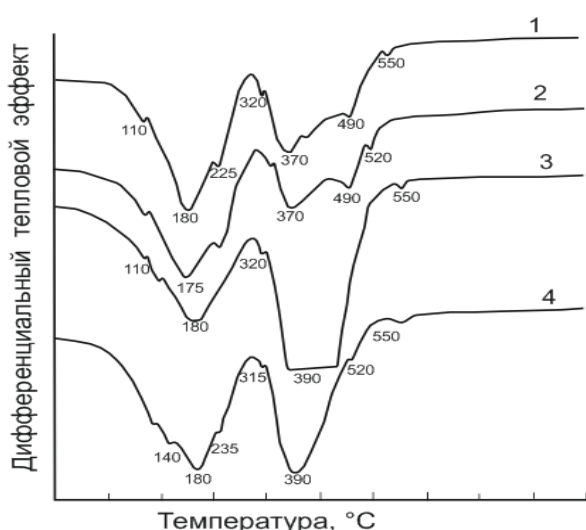


Рис. 2. Термограммы образцов магнезиального вяжущего через 28 сут твердения на воздухе (1, 2), в воде (3, 4), без добавки SiO₂ (1, 3), с добавкой 5 мас. % SiO₂ (2, 4)

сталлизованная с включениями периклаза и микротрещинами шириной до 2 мкм. На микрофотографии магнезиального камня с добавкой кремнезема (рис. 3) видны хорошо оформленные игольчатые структуры кристаллогидратов длиной не более 5 мкм и толщиной до 200 нм, которые выполняют армирующую роль в структуре цементной матрицы.

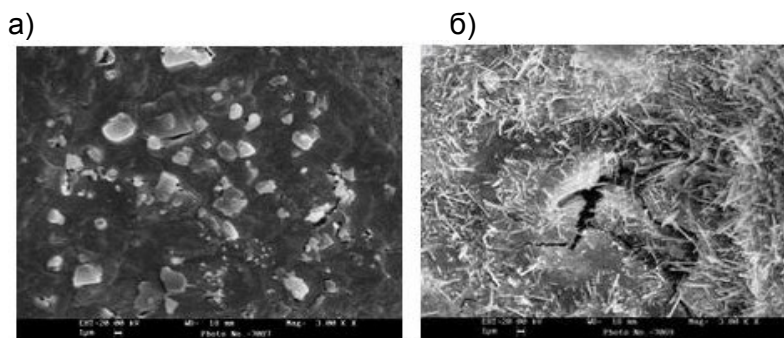


Рис. 3. Микрофотографии магнезиального камня, модифицированного добавкой аморфного кремнезема (x3000):
а – участок со слабо раскристаллизованной структурой и включениями периклаза (белые зерна);
б – кристаллогидраты пентаоксигидрохлорида магния

Состав продуктов твердения магнезиального камня, модифицированного добавкой кремнезема, в возрасте 28 сут представлен в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Состав основных новообразований магнезиального вяжущего через 28 сут твердения

Продукты твердения	Содержание, мас. %, при твердении			
	на воздухе		в воде	
	без добавки SiO ₂	с добавкой 1–6 мас. % SiO ₂	без добавки SiO ₂	с добавкой 1–6 мас. % SiO ₂
5MgO·MgCl ₂ ·13H ₂ O	32	31–36	19	19–25
3MgO·MgCl ₂ ·11H ₂ O	3	6–8	4	4–6
Mg(OH) ₂	9	3–6	32	21–23
MgO	56	46–63	45	48–50

Поскольку для исследований использовали ПМК, который является продуктом пылеулавливания, образующимся при производстве спеченного периклазового порошка, более половины оксида магния остается в свободном состоянии и, по всей вероятности, при даль-

нейшем твердении в воде MgO будет продолжать гидратироваться. Между тем исследования, выполненные с применением в качестве вяжущего частично обожженного доломита, показали, что содержащийся в нем оксид магния более реакционноспособен (через 28 сут он полностью прореагировал) [17]. Это объясняется тем, что в оксиде магния в составе каустического доломита не успевают сформироваться мотивы периклазовой структуры, так как для их образования требуется более высокая температура. Поэтому при решении проблемы получения качественных строительных материалов на основе магнезиального цемента необходимо в первую очередь организовать производство специального вяжущего для строительных целей.

Выводы

1. Введение в состав магнезиального вяжущего добавки тонкодисперсного кремнезема, полученного из шлаков медно-никелевого производства, способствует повышению водостойкости магнезиального вяжущего.

2. Структура магнезиального камня, модифицированного добавкой кремнезема, формируется в основном пента- и триоксигидрохлоридом магния, а также гидроксидом магния.

3. Добавка тонкодисперсного кремнезема в состав магнезиального вяжущего обеспечивает связывание MgO в комплексное оксигидрохлоридное соединение магния и кремния, характеризующееся повышенной водостойкостью.

4. Изменение основных свойств вяжущего связано с различиями в фазовом составе и структуре продуктов твердения. Увеличение содержания пентаоксигидрохлорида магния в составе вяжущего способствует повышению его прочности. Повышенное содержание в магнезиальном камне $Mg(OH)_2$ приводит к снижению прочности и увеличению склонности к растрескиванию, а повышенное содержание триоксигидрохлорида магния и образование оксигидрохлоридного соединения магния и кремния обеспечивают увеличение коэффициента водостойкости.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке программы ОХНМ-5 «Создание новых видов продукции из минерального и органического сырья».

ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнов Б. И., Соловьева Е. С., Сегалова Е. Е. Исследование химического взаимодействия окиси магния с растворами хлористого магния различных концентраций // ЖПХ. – 1967. – Т. 40, вып. 3. – С. 505–515.
2. Выродов И. П., Бергман А. Г. К вопросу о твердении магнезиальных вяжущих // ЖПХ. – 1959. – Т. 32, вып. 4. – С. 716–723.
3. Выродов И. П. Дифференциально-термическое исследование тройной системы $MgO-MgCl_2-H_2O$ // ЖПХ. – 1961. – Т. 34, вып. 6. – С. 1208–1218.
4. Выродов И. П. О структурообразовании магнезиальных цементов // ЖПХ. – 1960. – Т. 33, вып. 11. – С. 2399–2404.
5. Особобыстротвердеющее магнезиальное вяжущее / В. И. Корнеев, А. П. Сизоненко, И. Н. Медведева [и др.] // Цемент. – 1997. – № 2. – С. 25–28.
6. Федоров Н. Ф., Андреев М. А. Обжиговый магнезиально-хлоридный цемент // Цемент и его применение. – 2006. – № 3. – С. 76–78.
7. Зуев В. В., Поцелуева Л. Н., Гончаров Ю. Д. Кристаллоэнергетика как основа оценки свойств твердотельных материалов. – СПб.: Проспект науки, 2006. – 139 с.
8. Крамар Л. Я., Черных Т. Н., Трофимов Б. Я. Особенности твердения магнезиального вяжущего // Цемент и его применение. – 2006. – № 5. – С. 58–61.
9. Потапов В. В., Шитиков Е. С., Трутнев Е. С. Использование золь и порошков кремнезема, полученных из гидротермальных растворов, как нанодобавок в цементы // Химическая технология. – 2010. – № 10. – С. 597–604.
10. Роль аморфного микрокремнезема в процессах структурообразования и упрочнения бетонов / В. В. Бабков, Р. Р. Сахибгареев, Ром. Р. Сахибгареев [и др.] // Строительные материалы. – 2010. – № 6. – С. 44–46.
11. Reaction products of MgO and microsilica cementitious materials at different temperatures / Wei Jiangxiong, Yu Qijun, Zhang Wensheng [et al.] // Journal of Wuhan University of Technology Mater. Sci. Ed. – 2011. – Vol. 26, is. 4. – P. 745–748.

12. Брыков А. С. Силикатные и кремнеземсодержащие растворы и их применение // Техника и технология силикатов. – 2010. – Т. 17, № 1. – С. 2–18.
13. Пат. 2246464 Российская Федерация, МПК⁷ C04B28/30. Композиция на основе магнезиального вяжущего / Леонтьев И. В., Крамар Л. Я., Королев А. С. [и др.]. – № 2001122345/03; заявл. 08.08.01; опубл. 20.02.05, Бюл. № 5.
14. Водостойкие магнезиальные вяжущие на основе продуктов переработки шлака цветной металлургии / А. Г. Касиков, В. В. Тюкавкина, Б. И. Гуревич [и др.] // Строительные материалы. – 2013. – № 11. – С. 70–73.
15. Пат. 2428390 Российская Федерация, МПК C04B 9/06 (2006.01). Магнезиальное вяжущее / Тюкавкина В. В., Касиков А. Г., Гуревич Б. И. [и др.]. – № 2010127680/03; заявл. 05.07.10; опубл. 10.09.11, Бюл. № 25.
16. Получение аморфного кремнезема из шлаков цветной металлургии и его использование для магнезиальных вяжущих / В. В. Тюкавкина, А. Г. Касиков, Б. И. Гуревич [и др.] // Химическая технология. – 2014. – № 3. – С. 167–172.
17. Тюкавкина В. В., Гуревич Б. И. Влияние режимов обжига доломита на свойства магнезиального вяжущего // Сухие строительные смеси. – 2014. – № 1. – С. 33–36.

REFERENCES

1. Smirnov B. I., Solov'eva E. S., Segalova E. E. The study of the chemical interaction of magnesium oxide with magnesium chloride solutions of different concentrations. *ZhPKh*, 1967, vol. 40, is. 3, pp. 505–515 (in Russian).
2. Vyrodov I. P., Bergman A. G. To the question of hardening of magnesia binders. *ZhPKh*, 1959, vol. 32, is. 4, pp. 716–723 (in Russian).
3. Vyrodov I. P. Differential thermal study of the ternary system MgO–MgCl₂–H₂O. *ZhPKh*, 1961, vol. 34, is. 6, pp. 1208–1218 (in Russian).
4. Vyrodov I. P. About the structure formation of magnesia cements. *ZhPKh*, 1960, vol. 33, is. 11, pp. 2399–2404 (in Russian).
5. Korneev V. I., Sizonenko A. P., Medvedeva I. N., et al. Especially rapid-setting magnesia binder. *Tsement*, 1997, no. 2, pp. 25–28 (in Russian).
6. Fedorov N. F., Andreev M. A. Fired magnesia-chloride cement. *Tsement i ego primeneniye*, 2006, no. 3, pp. 76–78 (in Russian).
7. Zuev V. V., Potselueva L. N., Goncharov Yu. D. *Kristalloenergetika kak osnova otsenki svoystv tverdotel'nykh materialov* [Crystal energetics as a basis for assessment the properties of solid-state materials]. SPb.: Prospekt nauki, 2006, 139 p (in Russian).
8. Kramar L. Ya., Chernykh T. N., Trofimov B. Ya. Features hardening magnesia binder. *Tsement i ego primeneniye*, 2006, no. 5, pp. 58–61 (in Russian).
9. Potapov V. V., Shitikov E. S., Trutnev E. S. Use of sols and silica powders, obtained from hydrothermal solutions, as nano-additives to cement. *Khimicheskaya tekhnologiya*, 2010, no. 10, pp. 597–604 (in Russian).
10. Babkov V. V., Sakhibgareev R. R., Sakhibgareev Rom. R., et al. The role of amorphous microsilica in the processes of structure formation and hardening of concrete. *Stroitel'nye materialy*, 2010, no. 6, pp. 44–46 (in Russian).
11. Wei Jiangxiong, Yu Qijun, Zhang Wensheng, et al. Reaction products of MgO and microsilica cementitious materials at different temperatures. *Journal of Wuhan University of Technology Mater. Sci. Ed*, 2011, vol. 26, is. 4, pp. 745–748.
12. Brykov A. S. Silicate and silica-containing solutions and their application. *Tekhnika i tekhnologiya silikatov*, 2010, vol. 17, no. 1, pp. 2–18 (in Russian).
13. Patent RF 2246464. *Kompozitsiya na osnove magnezial'nogo vyazhushchego* [Composition based on magnesia binder]. Leont'ev I. V., Kramar L. Ya., Korolev A. S., et al. Declared 08.08.01. Published 20.02.05. Bulletin no. 5 (in Russian).
14. Kasikov A. G., Tyukavkina V. V., Gurevich B. I., et al. Water-resistant magnesia binders based products slag processing non-ferrous metallurgy. *Stroitel'nye materialy*, 2013, no. 11, pp. 70–73 (in Russian).
15. Patent RF 2428390. *Magnezial'noe vyazhushchee* [Magnesia binder]. Tyukavkina V. V., Kasikov A. G., Gurevich B. I., et al. Declared 05.07.10. Published 10.09.11. Bulletin no. 25 (in Russian).
16. Tyukavkina V. V., Kasikov A. G., Gurevich B. I., et al. Manufacture of amorphous silica from non-ferrous metallurgy slag and its use for magnesia binders. *Khimicheskaya tekhnologiya*, 2014, no. 3, pp. 167–172 (in Russian).

17. Tyukavkina V. V., Gurevich B. I. Effect of calcination regimes of dolomite on magnesia binder properties. *Sukhie stroitel'nye smesi*, 2014, no. 1, pp. 33–36 (in Russian).

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЕНООБРАЗУЮЩЕЙ СМЕСИ НА МОРФОЛОГИЮ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО ПЕНОСТЕКЛА

О. В. Пучка, С. С. Вайсера, БГТУ им. В. Г. Шухова, г. Белгород

Ключевые слова: пеностекло, теплоизоляция, коэффициент теплопроводности, пористость, прочность, водопоглощение, вспенивание, отжиг, теплоизоляционный материал

Key words: foam glass, heat insulation, heat conductivity coefficient, porosity, strength, water absorption, foaming, annealing, heat-insulating material

Теплофизические свойства ячеистого стекла во многом определяет его структура, основу которой составляют геометрически правильная укладка (упаковка) пор (ячеек), а также равномерность толщины межпоровых перегородок. Для получения материала с равномерной мелкопористой структурой необходима качественная подготовка исходных компонентов пенообразующей смеси [1]. Цель данной работы – оптимизация параметров пенообразующей смеси для производства высокоэффективного теплоизоляционного пеностекла с равномерной мелкопористой структурой. Была исследована зависимость удельной поверхности стеклопорошка от времени помола и рассмотрено влияние количества газообразователя, вводимого в пенообразующую смесь, на процесс вспенивания.

Анализ научных разработок в области производства теплоизоляционного пеностекла свидетельствует о недостаточном изучении влияния удельной поверхности стекольного порошка на энергоемкость производства. Еще в 70-е годы исследованием влияния удельной поверхности стеклопорошка на вспенивающую способность пеностекла занимался Б. К. Демидович. В работе [2] содержатся данные об изменении плотности пеностекла в зависимости от дисперсности навески (пробы) в диапазоне 100–700 м²/кг. Современное дробильно-помольное оборудование, в частности вибрационные мельницы периодического действия, позволяет получать стеклопорошок с удельной поверхностью 1000–1200 м²/кг. Стоит также отметить отсутствие данных по оптимизации количества сажи, влияющего на вспенивающую способность пеностекла, при использовании стеклопорошка с такой удельной поверхностью. В качестве газообразователя Б. К. Демидовичем применена сажа (0,3–0,5 мас. %) [2], а Ю. П. Горловым с сотрудниками – антрацит (1–3 мас. %) и каменноугольный кокс (0,5–2,5 мас. %) [3].

В производстве теплоизоляционного пеностекла традиционно используют стекла, при выборе которых исходят из специфических условий пенообразования в высоковязком стекольном расплаве. Химический состав стекла должен обеспечивать низкую склонность к кристаллизации, а также достаточное количество активного окисляющего компонента для протекания реакции вспенивания. Для газообразователей на основе углерода необходимо присутствие в стекле 0,1–0,4 мас. % окисляющего вещества (например, SO₃, As₂O₃) [4]. В большинстве случаев производство пеностекла базируется на применении боя тарного (чаще всего бутылочного) или листового стекла. Составы стекол, используемых для получения пеностекла в различных странах мира, приведены в таблице [4].

Химические составы стекол для производства пеностекла

Страна	Содержание оксидов, мас. %						
	SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O + K ₂ O	SO ₃
Россия	69,7–73,5	0,0–1,78	0,5–6,4	6,0–10,8	3,5–11,22	14,0–16,5	0,2–0,5
США	40–75	2–15	0–20	5–20	0–10	–	0,34–0,54
Великобритания	72–74	–	0–2	8–12	–	13–17	≤ 0,50
Франция	70–72,7	0–3,6	2–7	4,9–7,6	3	14	0,40
Индия	71	–	4	7	3	15	0,20

В качестве исходного сырья для получения блочного пеностекла обычно применяют стеклогранулят (продукт стекловарения) или стеклобой, причем одного химического со-