

А.Ю. Шевченко /к.х.н./, В.В. Калинин
ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ БЕТОНЫ С ДОБАВКАМИ МИКРОКРЕМНЕЗЕМА

Исследована возможность получения теплоизоляционного пенобетона с улучшенными характеристиками для футеровки тепловых агрегатов. Изучено влияние добавки микрокремнезема на основные свойства теплоизоляционного бетона. Предложен состав бетона на основе портландцемента, шамотно-каолиновой пыли, микрокремнезема. Экспериментально определены основные показатели свойств бетона разработанного состава (механическая прочность, температура применения, плотность, пористость, коэффициент теплопроводности).

Ключевые слова: теплоизоляционный бетон, портландцемент, микрокремнезем, шамотно-каолиновая пыль, прочность, температура применения.

В последние годы широкое распространение получили легкие бетоны с пористой структурой, обладающие теплоизоляционными свойствами. К особо легким бетонам относятся ячеистые (газобетоны, пенобетоны). Теплоизоляционные ячеистые бетоны отличаются малым объемным весом (менее 1000 кг/м³), низким коэффициентом теплопроводности и достаточной прочностью. В строительстве применяются различные изделия из ячеистых бетонов (панели, блоки, плиты для кровель промышленных сооружений и др.). Жаростойкие теплоизоляционные бетоны могут быть использованы для футеровки промышленных печей и других тепловых агрегатов.

Для регулирования свойств бетона в его состав вводят разные химические добавки, ускоряющие или замедляющие твердение, повышающие прочность, изменяющие другие характеристики бетона. Одной из наиболее эффективных специальных добавок, влияющих на свойства бетона, является микрокремнезем. Микрокремнезем является отходом производства при получении кремния, ферросилиция и силикомарганца. Содержание SiO₂ колеблется в пределах 80-95 %. Рентгеноструктурным анализом установлено наличие в микрокремнеземе монооксида кремния в виде коусита, что придает ему высокую химическую активность. Аналитический обзор литературных источников по изучаемой проблеме показал, что в ряде работ, в частности [1-3], приведена информация о положительном влиянии добавок микрокремнезема на прочность и химическую стойкость бетона. Однако при

этом отсутствуют данные о конкретных составах бетонов, а изложенная в литературе информация касается в основном строительных материалов. Целью исследований данной работы является разработка состава жаростойкого бетона на основе техногенных материалов, предназначенного для футеровки тепловых агрегатов.

В работе изучено влияние добавки микрокремнезема на свойства теплоизоляционного пенобетона. При изготовлении бетона в качестве вяжущего использовали портландцемент марки ПЦ 1-500 производства ПАО «Хайдельбергцемент». Минералогический состав цементного клинкера: трехкальциевый силикат – 60 %, двухкальциевый силикат – 18,6 %, трехкальциевый алюминат – 7,6 %, четырехкальциевый алюмоферрит – 11,3 %. В качестве заполнителя использовали шамотно-каолиновую пыль ПАО «Великоанадольский огнеупорный комбинат». Шамотная пыль образуется как побочный продукт при обжиге каолина Владимировского месторождения во вращающихся печах. Является тонкодисперсным порошком, в минералогическом составе преобладает частично дегидратированный каолинит. В табл. 1 приведен химический состав шамотно-каолиновой пыли, в табл. 2 – характеристика физико-химических свойств. В качестве стабилизатора ячеистой структуры использовали гипс компании ООО «КНАУФ Гипс Донбасс». В качестве корректирующей добавки исследован микрокремнезем из шламонакопителей ОАО «Стахановский завод ферросплавов» химического состава, приведенного в табл. 3.

Табл. 1. Химический состав шамотно-каолиновой пыли

Компонент	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Потери при прокаливании
Содержание, %	49-55	28-40	0,8-1,4	0,4-2,5	0,3-0,4	0,15-0,2	0,1-0,15	0,05-0,1	0,05	1,7-2,5

Табл. 2. Характеристика
шамотно-каолиновой пыли

Наименование показателя	Значение показателя
Огнеупорность, °С	1710-1750
Размер зерен, мкм	15-180
Насыпная масса, г/см ³	0,47-1,8
Число пластичности, %	5-7
Температура спекания, °С	1500

Формование образцов пенобетона осуществляли способом шликерного литья пеномассы в металлические формы. Для получения образцов готовили смеси из следующих компонентов: портландцемент – 30-40 %, шамотно-каолиновая пыль – 60-70 %, гипс – 5 % (сверх 100 %), микрокремнезем – 1-10 % (сверх 100 %). Шамотно-каолиновую пыль и высушенный микрокремнезем измельчали до прохода через сито 02. Сухие компоненты тщательно перемешивали, увлажняли водным раствором вспенивателя до влажности шликера 80±5 %, разливали в формы размером 40×40×40 мм. Образцы выдерживали при комнатной температуре 7, 28 и 60 суток.

Вначале были проведены испытания для выбора огнеупорного заполнителя бетона на образцах следующего состава: портландцемент – 40 %, шамот или шамотно-каолиновая пыль – 60 %, гипс – 5 % (сверх 100 %), микрокремнезем – 0 и 5 % (сверх 100 %). Образцы после формования выдерживали в контейнере над водой в течение 7 суток (распалубка через 24 ч.), после чего испытывали на прочность при сжатии, предварительно взвесив образцы с точностью до 0,1 % и выполнив замеры штангенциркулем с

точностью до 0,1 мм. Испытуемые образцы разрушали на гидравлическом прессе, обеспечивающем равномерный и плавный подъем нагрузки до полного разрушения образца. Результаты испытаний приведены в табл. 4 (средние значения из серии 5 образцов с отклонением значений не более 10 %).

На основании данных табл. 4 можно сделать вывод о том, что при использовании шамотно-каолиновой пыли прочность образцов при сжатии выше, чем при использовании шамота в качестве огнеупорного заполнителя, поэтому дальнейшие эксперименты проведены с применением шамотно-каолиновой пыли.

Для изучения влияния добавки микрокремнезема на прочность теплоизоляционного бетона изготовлены и исследованы образцы следующего состава: портландцемент – 40 %, шамотно-каолиновая пыль – 60 %, гипс – 5 % (сверх 100 %), микрокремнезем – 0-5 % (сверх 100 %). Образцы выдерживали 28 и 60 суток на воздухе, после чего испытывали на сжатие. Результаты определения предела прочности при сжатии приведены в табл. 5.

Результаты эксперимента показали увеличение прочности материала при добавлении микрокремнезема. Высокая дисперсность и химическая активность микрокремнезема способствуют более эффективной и быстрой реакции между диоксидом кремния и гидроксидом кальция, протекающей при гидратации портландцемента. Сферические микрочастицы SiO₂ окружают каждое зерно цемента, образуя плотный цементный раствор, заполняя пустоты продуктами гид-

Табл. 3. Химический состав микрокремнезема

Компонент	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅
Содержание, %	93,2	0,85	0,01	3,21	1,13	0,2	0,42	0,56	0,01	0,09

Табл. 4. Сравнительная характеристика использования шамота и шамотно-каолиновой пыли в качестве заполнителя для бетонной смеси

Компоненты массы	Предел прочности при сжатии, кгс/см ²
Портландцемент Гипс Шамотно-каолиновая пыль	1,48
Портландцемент Гипс Шамотно-каолиновая пыль Микрокремнезем	1,7
Портландцемент Гипс Шамот	0,71
Портландцемент Гипс Шамот Микрокремнезем	0,87

Табл. 5. Прочность при сжатии экспериментальных образцов пенобетона с добавками микрокремнезема

Компоненты массы	Предел прочности при сжатии, кгс/см ²
Выдержка 28 суток	
Портландцемент Гипс Шамотно-каолиновая пыль	1,6
Портландцемент Гипс Шамотно-каолиновая пыль Микрокремнезем	2,57
Выдержка 60 суток	
Портландцемент Гипс Шамотно-каолиновая пыль	3,4
Портландцемент Гипс Шамотно-каолиновая пыль Микрокремнезем	5,08

ратации, улучшая сцепление с зернами заполнителя.

Для определения оптимального количества добавки микрокремнезема изготовлены образцы с различным его содержанием: 2,5; 5; 7,5 и 10 %. Сформованные образцы выдерживали в контейнере над водой 7 суток, после чего подвергали испытанию на сжатие. Результаты испытаний (табл. 6) показали повышение предела прочности при сжатии от 1,5 до 4,37 кгс/см² при увеличении содержания добавки от 0 до 10 %. Рекомендуемое количество добавки – 10 %.

Поскольку предполагаемой областью использования разрабатываемых составов бетонов является футеровка тепловых агрегатов, было проведено исследование влияния микрокремнезема на температуру применения бетона. Для этого изготовлены образцы следующего состава: портландцемент – 40 %, шамотно-каолиновая пыль – 60 %, гипс – 5 % (сверх 100 %), микрокремнезем – 0, 5, 10 % (сверх 100 %). Все образцы сушили на воздухе, после чего выдерживали в сушильном шкафу в течение 5 часов при температуре 50 °С, определяли линейные размеры (по диагонали) с помощью штангенциркуля. После этого образцы подвергали термообработке в лабораторной муфельной электрической печи при разных температурах с шагом 50 °С. После нагревания до определенной температуры образцы осматривали и определяли линейную усадку, которую рассчитывали по формуле [4]:

$$y = \frac{l_1 - l_2}{l_0} \cdot 100,$$

где l_0 , l_1 и l_2 – длина образца свежеформованного, после сушки и обжига, соответственно, мм.

Результаты определения температуры применения бетона представлены в табл. 7.

Как видно из табл. 7, при температуре 650 °С образцы без добавки микрокремнезема начинают деформироваться. Образцы с добавкой микрокремнезема не изменяются до температуры 750 °С, при температуре 800 °С на образцах с микрокремнеземом начинают появляться мелкие трещины. При 850 °С образец без микрокремнезема разрушается, а на образцах с микрокремнеземом появляются значительные трещины. Таким образом, можно сделать вывод о значительном повышении температуры применения пенобетона при введении в его состав добавок микрокремнезема. На основании проведенных экспериментальных исследований можно считать целесообразным использование добавок микрокремнезема в составе теплоизоляционных пенобетонов для повышения их температуры применения и механической прочности.

Для образцов пенобетона с добавками микрокремнезема

Табл. 6. Результаты определения прочности при сжатии образцов с разным содержанием микрокремнезема

Количество микрокремнезема в составе смеси, %	Предел прочности при сжатии образцов, кгс/см ²
0	1,5
2,5	1,55
5	1,71
7,5	2,78
10	4,37

Табл. 7. Результаты определения температуры применения и усадки образцов

Количество микрокремнезема, %	Температура, °С	Усадка, %	Примечание
0	500	2,6	
	550	2,6	
	600	3,4	
	650	3,4	Деформация
	700	3,4	Мелкие трещины
	750	4,3	
	800	5,2	Значительные трещины
5	500	3,5	
	550	3,5	
	600	4,3	
	650	4,3	
	700	5,2	
	750	5,2	
	800	6,9	Мелкие трещины
10	500	2,6	
	550	4,3	
	600	4,3	
	650	4,3	
	700	5,2	
	750	5,2	
	800	6,9	Мелкие трещины

рокремнезема были также определены кажущаяся и истинная плотности по стандартным методикам [4], рассчитана общая пористость. Значения плотности составляют для образцов с добавками 5 и 10 % микрокремнезема соответственно: кажущаяся – 0,55 и 0,59 г/см³, истинная – 2,33 и 2,35 г/см³. Общая пористость составляет 70-80 %.

Для определения коэффициента теплопроводности материала изготовлены образцы с содержанием микрокремнезема 10 % размером 35×130×150 мм, высушены в сушильном шкафу при температуре 90-100 °С до постоянной массы. Каждый образец распиливали на две равные части, между половинами помещали нагревательный элемент (провода с высоким сопротивлением), конструкцию теплоизолировали картоном. К нагревательному элементу подключали источник тока с элементом регулирования. С помощью хромель-копелевой термопары определяли температуру в разных точках и рассчитывали коэффициент теплопроводности по формуле [5]:

$$\lambda = 0,21 + 0,00043 \cdot t_{cp},$$

где t_{cp} – средняя температура между нагретой и холодной поверхностями образца.

Получены следующие значения коэффициента теплопроводности (Вт/(м·К)): $\lambda=0,36$ при

средней температуре 350 °С, $\lambda=0,39$ при средней температуре 420 °С, $\lambda=0,4$ при средней температуре 450 °С.

На основании проведенных исследований может быть рекомендован следующий состав пенобетона: портландцемент – 40 %, шамотно-каолиновая пыль – 60 %, гипс – 5 % (сверх 100 %), микрокремнезем – 10 % (сверх 100 %). Использование шамотно-каолиновой пыли в качестве заполнителя дает возможность повысить температуру применения материала, а также утилизировать техногенный продукт, образующийся при обжиге каолина на шамот во вращающихся печах. Введение микрокремнезема в состав бетонных смесей не только способствует повышению температуры применения, но и существенно увеличивает прочность пенобетона.

Выводы

Исследованы теплоизоляционные пенобетоны различных составов, изготовленные на основе портландцемента, шамотно-каолиновой пыли, гипса и микрокремнезема. Показана целесообразность использования добавки микрокремнезема для изготовления пористых бетонов. Введение в массу 10 % микрокремнезема увеличивает прочность на сжатие изделий почти в 3 раза, температуру применения на 150 °С. Для образцов пенобетона предложенного состава экспериментально определены следующие показатели: коэффициент теплопроводности – 0,3-0,4

Вт/(м·К), общая пористость – 70-80 %, кажущаяся плотность – 0,4-0,6 г/см³. Использование шамотно-каолиновой пыли и микрокремнезема дает возможность не только улучшить технические характеристики изделий, но также утилизировать техногенные продукты.

Список литературы

1. Пивинский Ю.Е. Неформованные огнеупоры. – М.: Теплоэнергетик, 2003. – 448 с.
 2. Микрокремнезем и его применение [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://>

www.technoros.ru/catalog/3/27/?PHPSESSID=519t3dvrs5rbai423

3. Проблема развития производства пенобетона [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fluke-net.com/problemy-razvitiya-proizvodstva-penobetona.html>
 4. Лукин Е.С., Андрианов Н.Т. Технический анализ и контроль производства керамики. – М.: Стройиздат, 1986. – 272 с.
 5. Левченко П.В. Расчет печей и сушил силикатной промышленности. – М.: Высшая школа, 1968. – 365 с.

A.Y. Shevchenko /Sci. Cand. (Chem.)/, V.V. Kalinchuk
Donetsk National Technical University (Donetsk)

INSULATION CONCRETES WITH MICRO SILICA ADDITIVES

Background. *In recent years, widespread are light concretes of the porous structure with insulating properties. Particularly lightweight concretes include cellular concretes (aerated concretes, foam concretes). To adjust the properties of concrete various chemical additives are put in its composition that accelerate or retard the hardening, increase the strength or change other properties of concrete. The influence of micro silica additives on heat insulation properties of foam concrete is investigated in the paper.*

Materials and/or methods. *In the manufacture of concrete portland cement PC 1-500 produced by PJSC "HeidelbergCement" was used as a binder and chamotte-kaolin dust of PJSC "Velikoanadolskiy Refractory Integrated Works" as a filler. The gypsum of LLC "KNAUF GIPS Donbass" was used as a stabilizer of cellular structures. The silica from tailings of JSC "Stakhanov Ferroalloy Plant" was investigated as a corrective additive. Forming samples of the foam concrete was carried out by the method of slip casting of foam in a metal mold. The samples were held at room temperature for 7, 28 and 60 days. The ultimate strength of samples in compression, the temperature of the concrete, apparent and true density, the coefficient of thermal conductivity of the material was determined according to standard procedures.*

Results. *The influence of micro silica additives on the basic properties of insulating concrete is studied. Concrete mix based on portland cement, chamotte-kaolin dust, micro silica is proposed. Experimentally determined are major indicators of the properties of the developed concrete composition (mechanical strength, application temperature, density, porosity, heat conductivity).*

Conclusion. *Studies have shown the feasibility of use of the micro silica additive for the manufacture of porous concrete. The use of chamotte-kaolin dust and micro silica gives the opportunity not only to improve technical characteristics of product, but also recycle technogenic products. The development of more efficient insulating materials contributes to the solution of the problem of reducing energy consumption and the cost of main products.*

Keywords: *insulating concrete, portland cement, micro silica, chamotte-kaolin dust, durability, application temperature.*

Сведения об авторах

А.Ю. Шевченко

SPIN-код: 3767-3831
 Телефон: +380 (99) 784-18-31
 Эл. почта: troshina@feht.dgtu.donetsk.ua

В.В. Калинин

*Статья поступила 19.06.2015 г.
 © А.Ю. Шевченко, В.В. Калинин, 2016
 Рецензент д.х.н., проф. Л.Ф. Бутузова*