

Известия вузов. Строительство. 2022. № 1. С. 31–43.

ISSN 0536-1052

News of Higher Educational Institutions. Construction. 2022; (1): 31–43.

ISSN 0536-1052

Научная статья

УДК 691.311:666.941.2

DOI: 10.32683/0536-1052-2022-757-1-31-43

ГИПСОВЫЕ И МАГНЕЗИТОВЫЕ ПРЕССОВАННЫЕ КОМПОЗИТЫ ПОВЫШЕННОЙ СТОЙКОСТИ К ПОПЕРЕМЕННОМУ УВЛАЖНЕНИЮ И ВЫСУШИВАНИЮ

Александр Викторович Каклюгин¹, Нонна Степановна Ступень²,
Любовь Ивановна Касторных¹, Виктор Викторович Коваленко²

¹Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

²Брестский государственный университет имени А.С. Пушкина, Брест,
Республика Беларусь

Аннотация. Показана возможность повышения водо- и воздухостойкости прессованных мелкоштучных гипсовых и магнезитовых изделий за счет введения в состав формовочных смесей модифицирующих наполнителей, являющихся вторичными ресурсами. В исследованных составах на основе низкомарочного гипсового вяжущего в этих целях использовали комплексный модификатор, состоящий из карбонатсодержащего шлама химводоочистки ТЭЦ и однозамещенного фосфата аммония. В композициях на основе каустического магнезита применяли микрокремнезем и тонкомолотую горелую породу шахт. Проведена сравнительная оценка воздухостойкости разработанных составов модифицированных гипсовых и магнезитовых композитов. Установлено, что более высокая водостойкость материала, оцениваемая по величине коэффициента размягчения, не обязательно гарантирует и его лучшее сопротивление попеременному увлажнению-высушиванию. Выявлено, что химический состав и характер кристаллизационной структуры модифицированных гипсовых композитов обуславливают их лучшее сопротивление знакопеременным напряжениям при циклических увлажнениях и высушиваниях в сравнении с магнезитовыми.

Ключевые слова: гипсовые вяжущие вещества, каустический магнезит, модифицирующие наполнители, прессованные композиты, водостойкость, воздухостойкость

Для цитирования: Каклюгин А.В., Ступень Н.С., Касторных Л.И., Коваленко В.В. Гипсовые и магнезитовые прессованные композиты повышенной стойкости к попеременному увлажнению и высушиванию // Известия вузов. Строительство. 2022. № 1. С. 31–43. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-757-1-31-43.

Original article

PRESSED GYPSUM AND MAGNESITE COMPOSITES OF INCREASED RESISTANCE TO ALTERNATE WETTING AND DRYING

Alexander V. Kaklyugin¹, Nonna S. Stupen², Lyubov I. Kastornykh¹,
Viktor V. Kovalenko²

¹Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

²Brest State A.S. Pushkin University, Brest, Republic of Belarus

Abstract. The results of studies aimed at the possibility of increasing the water and air resistance of pressed small-piece gypsum and magnesite products by introducing modifying fillers into the composition of molding mixtures, which are secondary resources. In the studied compositions based on a low-grade gypsum binder, a complex modifier was used consisting of a carbonate-containing sludge from the chemical purification of thermal power plant water and monosubstituted ammonium phosphate. Microsilicon and finely ground mine burnt rock were used in compositions based on caustic magnesite. A comparative assessment of the air resistance of the developed compositions of modified gypsum and magnesite composites was carried out. It was found that the higher water resistance of the material, estimated by the value of the softening coefficient, does not necessarily guarantee its better resistance to alternate wetting and drying. It was revealed that the chemical composition and the nature of the crystallization structure of modified gypsum composites cause their better resistance to alternating stresses during cyclic wetting and drying in comparison with magnesite ones.

Keywords: low-temperature calcined gypsum binder, caustic magnesite, modifiers fillers, press-formed composites, water resistance, alternate wetting and drying resistance

For citation: Kaklyugin A.V., Stupen N.S., Kastornykh L.I., Kovalenko V.V. Pressed gypsum and magnesite composites of increased resistance to alternate wetting and drying. *News of Higher Educational Institutions. Construction.* 2022; (1): 31–43. (In Russ.). DOI: 10.32683/0536-1052-2022-757-1-31-43.

Введение. Для многих регионов мира, где развито производство гипсовых и магнезиальных вяжущих веществ или имеются значительные запасы соответствующих видов исходного сырья, весьма актуальной является задача расширения производства строительных изделий на основе этих вяжущих [1, 2]. Гипсовые и магнезитовые строительные изделия хорошо сохраняют свои прочностные, физические, декоративные и другие свойства при использовании во внутренних конструкциях зданий и сооружений с сухим режимом помещений. Однако для них характерны низкие водо- и морозостойкость, а также значительная ползучесть под нагрузкой во влажных условиях [3, 4]. В случае частичного или полного устранения указанных недостатков открываются перспективы использования этих воздушных вяжущих веществ для изготовления мелкоштучных изделий для стен малоэтажных зданий, а также помещений с влажным режимом, относительная влажность в которых превышает 60 % [5, 6].

Один из способов повышения водостойкости изделий на основе воздушных вяжущих веществ – увеличение их средней плотности. Этого можно достичь за счет использования в составе формовочных смесей водоредуцирующих добавок или применения интенсивных способов их уплотнения, наиболее эффективный из которых прессование. Однако пористость получаемых прессованных композитов остается значительной, что негативно сказывается на способности их структуры сопротивляться расклинивающему действию водных пленок, адсорбирующихся на внутренних поверхностях микротрещин и пор при водонасыщении [7]. С целью снижения остаточной пористости прессованных композитов в настоящих исследованиях использовали тонкодисперсные наполнители, являющиеся вторичными ресурсами. Это должно способствовать снижению себестоимости изделий и позволяет отнести предлагаемый способ их производства к наилучшим доступным технологиям [8, 9 и др]. При выборе наполнителей учитывали их способность оказывать

модифицирующее действие на физико-химические процессы твердения вяжущих веществ и структуру получаемых материалов. Химическое взаимодействие модифицирующих добавок с компонентами вяжущих веществ и между собой должно обеспечивать образование труднорастворимых соединений, в том числе в виде экранирующих защитных пленок на кристаллах возникающих гидратных новообразований [9–11]. При этом в смесях с малым водосодержанием гидратация вяжущего вещества будет происходить не только за счет свободной несвязанной воды затворения, но в дальнейшем по мере ее расходования и за счет воды, адсорбированной зернами наполнителя. Гидратные новообразования, размещаясь в дефектах структуры материала, будут способствовать снижению его остаточной пористости, повышению прочности и водостойкости [12, 13].

Модификацию каустического магнезита осуществляли за счет введения в его состав микрокремнезема и тонкомолотой горелой породы, а низкообжигового гипсового вяжущего – комплексного модификатора, состоящего из карбонатсодержащего шлама химводоочистки теплоэлектростанций и однозамещенного фосфата аммония. Механизм действия применяемых добавок и свойства получаемых прессованных композитов повышенной водостойкости подробно описаны, например, в [14, 15].

Однако, на наш взгляд, не все материалы, незначительно теряющие прочность при водонасыщении в лабораторных условиях, можно признать достаточно долговечными и пригодными для использования в ограждающих конструкциях зданий и в помещениях с относительной влажностью воздуха более 60 %. Следует учитывать, что в реальных условиях эксплуатации такие материалы крайне редко подвергаются полному обезвоживанию или водонасыщению, а в нашем случае прессованные композиты сохраняют достаточно высокую прочность на сжатие в водонасыщенном состоянии [15]. Поэтому одним из важнейших критериев долговечности указанных видов строительных материалов и изделий является их воздухоустойкость, оцениваемая путем проведения более жестких испытаний на способность сопротивляться попеременному увлажнению и высушиванию. Такие циклические воздействия расшатывают структуру материала, ускоряют трещинообразование, снижают стойкость к агрессивным воздействиям. В итоге это приводит к разрушению изделий, объясняемому прежде всего изменением их объема в наружных и внутренних зонах и, как следствие, появлением значительных растягивающих и скалывающих напряжений [16].

Целью настоящей работы является сравнительная оценка стойкости к попеременному увлажнению и высушиванию (воздухоустойкости) модифицированных прессованных композитов на основе низкомарочного гипсового вяжущего β -модификации и каустического магнезита.

Материалы и методы. Экспериментальные исследования проводили с использованием нормально твердеющего гипсового вяжущего среднего помола марки Г-5 по ГОСТ 125–2018 «Вяжущие гипсовые. Технические условия» и каустического магнезита марки ПМК-75 по ГОСТ 1216–87 «Порошки каустические магнезитовые. Технические условия».

С целью повышения водо- и атмосферостойкости прессованных гипсовых композитов применяли комплексный модификатор, состоящий из шлама химводоочистки ТЭЦ-2 г. Ростова-на-Дону и однозамещенного фосфата

аммония ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$). Высушенный шлам представляет собой порошок желтоватого цвета с удельной поверхностью $780 \text{ м}^2/\text{кг}$, состоящий, согласно данным химического и ряда других анализов, на 75 % из карбоната кальция. В исследуемых составах часть гипсового вяжущего заменяли шламом химводоочистки, а полученную композицию затворяли водным раствором однозамещенного фосфата аммония. При этом водотвердое отношение принимали близким к теоретически необходимому для обеспечения полной гидратации гипсового вяжущего, что обеспечивает получение прочной мелкокристаллической структуры прессованных композитов, а также сохранение ее стабильности во времени [7, 14].

Модификацию структуры и продуктов твердения магнетитовых композитов осуществляли введением минеральных добавок, обладающих пуццоланическими свойствами – микрокремнезема и тонкомолотой горелой породы шахт. Микрокремнезем представляет собой высокодисперсную пыль (удельная поверхность $2000 \text{ м}^2/\text{кг}$), образующуюся при восстановлении высокочистого кварца углем в дуговых печах при изготовлении кремния и ферросилиция. Применяемая горелая порода – продукт окислительного самообжига в терриконах пород, извлекаемых вместе с углем на шахтах Ростовской области, с глинисто-железистым модулем $M_{г.ж} = 0,49$. В качестве затворителя каустического магнетита использовали раствор природного бишофита плотностью $1,28 \text{ г}/\text{см}^3$ при соотношении $\text{MgO} / \text{MgCl}_2$ в формовочной смеси равном 0,072 [7, 15].

Приготовление исследуемых сырьевых смесей осуществляли на лабораторной бегунковой растворомешалке путем перемешивания компонентов в течение 5 мин. Оценка стойкости материалов к попеременному увлажнению-высушиванию (воздухостойкость) проводили на образцах-цилиндрах высотой и диаметром 50,5 мм. Образцы изготавливали с использованием специальных пресс-форм под давлением 40 МПа. Перед испытаниями образцы твердели в воздушно-сухих условиях. Продолжительность твердения образцов, отформованных из модифицированного гипсового вяжущего, составляла 3 сут, а каустического магнетита – 28 сут.

Методику оценки стойкости прессованных композитов к попеременному увлажнению-высушиванию разработали на основании анализа работ других авторов, проводивших аналогичные испытания ранее, например, в [16]. В этих целях образцы сначала в течение 3 ч выдерживали в воде при температуре $(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$, а затем высушивали 15 ч при такой же температуре. После этого их еще высушивали в течение 6 ч в сушильном шкафу при температуре $(55 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$. Указанные операции по водонасыщению и высушиванию принимали за один цикл испытаний. Принятую в опытах продолжительность выдерживания образцов в воде определяли из условия, что в течение этого времени их водонасыщение достигает примерно 85 % максимально возможного значения. После каждых 10 циклов увлажнения-высушивания для физико-механических испытаний отбирали по 10 образцов.

Физико-механические характеристики прессованных композитов определяли по стандартным и общепринятым методикам. Перед испытанием гипсовые образцы высушивали в сушильном шкафу до постоянной массы при температуре $(55 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$, а из каустического магнетита – $(105 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$. После этого половину образцов каждой серии погружали в воду на 48 ч. Высушен-

ные и водонасыщенные образцы испытывали на предел прочности при сжатии. По показателям прочности образцов на сжатие определяли коэффициенты размягчения (k_p) и воздухоустойкости (k_b). Первый вычисляли как соотношение прочности на сжатие контрольных образцов в водонасыщенном и сухом состоянии, а второй – как частное от деления прочности высушенных до постоянной массы образцов, прошедших N циклов испытаний, к прочности контрольных образцов (при «нулевом» цикле испытаний). Считали, что материал выдерживает испытания, если коэффициент воздухоустойкости остается не менее 0,75.

Возникновение и развитие необратимых деформаций при попеременных увлажнении-высушивании изучали на образцах-призмах размером $40 \times 40 \times 160$ мм, в торцах которых в процессе формования были зафиксированы стальные пластинки размером 40×40 мм с анкерами. Измерение деформаций производили с помощью штатива с индикатором часового типа с ценой деления 0,01 мм. Углубления, сделанные керном в геометрических центрах анкерных пластинок, обеспечивали измерение деформации в одних и тех же точках. Контроль надежности измерений и учет температурных погрешностей обеспечивали с помощью стального эталона, имеющего такие же геометрические характеристики, что и опытные образцы. Перед измерением деформаций производили отсчет по эталону, после чего последний помещали в воду, где находились образцы, подлежащие очередным измерениям. По окончании измерения деформаций всех образцов эталон извлекали из воды и снимали второй отсчет. Разность размеров до и после помещения эталона в воду учитывали при подсчете величины деформации. Измерения образцов производили через каждые 10 циклов попеременных увлажнений и высушиваний.

Результаты исследований. Оценку стойкости прессованных композитов на основе модифицированных гипсового вяжущего и каустического магнетита к попеременному увлажнению и высушиванию проводили с использованием контрольных образцов-цилиндров, отформованных из смесей, составы которых в предварительных опытах показали наилучшие результаты по прочности на сжатие и водостойкости [7, 15]. Составы исследуемых формовочных смесей и физико-механические характеристики отформованных из них образцов приведены в таблице.

Характер изменения прочности на сжатие контрольных образцов в сухом и водонасыщенном состоянии по мере увеличения числа циклов попеременных увлажнений-высушиваний показан на рис. 1.

Из представленных на рис. 1 графиков видно, что прочность на сжатие прессованных композитов всех исследованных составов в высушенном состоянии в течение первых 20 циклов испытаний незначительно повышается, а затем по мере нарастания количества циклов попеременного увлажнения и высушивания наблюдается ее существенное понижение. Как и следовало ожидать, на основании результатов наших предварительных опытов [14, 15], наиболее заметно теряют прочность прессованные образцы, не содержащие модифицирующих добавок (состав 1 – каустический магнетит, состав 4 – гипсовое вяжущее). При этом образцы из бездобавочного каустического магнетита были сняты с испытаний после 60 циклов попеременного увлажнения и высушивания по причине значительного снижения прочности и наличия ви-

Составы формовочных смесей и физико-механические характеристики прессованных модифицированных композитов
Compositions of molding mixtures and physical and mechanical characteristics of pressed modified composites

Состав	Содержание, мас. %					Предел прочности образцов при сжатии, МПа		Коэффициент размягчения	Средняя плотность, кг/м ³	Водопоглощение, мас. %	Открытая пористость, %
	каустический магнетит	микрокремнезем	горелая порода	гипсовое вяжущее	шлам хим.водоочистки ТЭЦ	сухих	водонасыщенных				
1	100	–	–	–	–	41,1	22,1	0,54	1900	13,9	26,4
2	85	15	–	–	–	62,8	44,6	0,71	2108	5,7	11,3
3	80	–	20	–	–	49,3	44,3	0,89	2160	7,1	15,3
4	–	–	–	100	–	32,0	5,3	0,17	1800	11,0	19,8
5	–	–	–	80	20	61,7	44,0	0,71	1950	5,8	11,3
6	–	–	–	60	40	46,8	29,5	0,63	1860	8,5	15,8

димых признаков разрушения. Прессованные образцы из каустического магнетита с пуццолановыми добавками (составы 2 и 3) и из модифицированного гипсового вяжущего (составы 5 и 6) оказались значительно более стойкими к попеременным увлажнениям и высушиваниям. Однако если принять допустимое снижение начальной прочности материала в процессе циклических

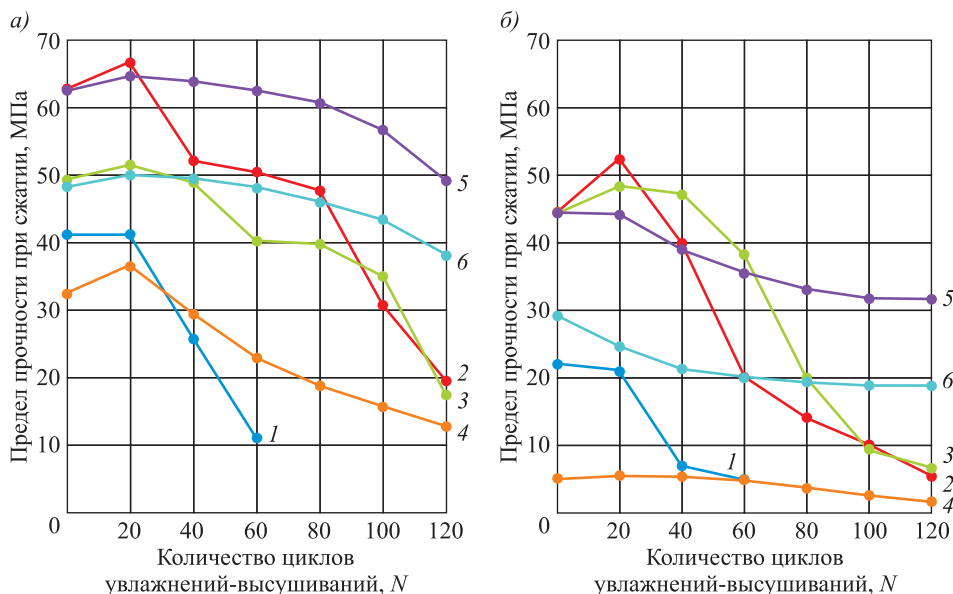


Рис. 1. Зависимость прочности образцов на сжатие в высушенном (а) и водонасыщенном (б) состоянии от числа циклов попеременного увлажнения и высушивания 1–6 – номера составов

Fig. 1. Dependence of the compressive strength of the samples in the dried (a) and water-saturated (b) state on the number of cycles of alternating humidification and drying 1–6 – composition numbers

испытаний не более чем на 25 %, то стойкость к попеременному увлажнению и высушиванию прессованного модифицированного гипсового вяжущего оказалась примерно в 1,5 раза выше. Так, предел прочности на сжатие высушенных образцов, изготовленных из составов 2 и 3, уменьшился на 25 % соответственно через 80 и 85 циклов испытаний, а указанное снижение прочности гипсовых образцов (составы 5 и 6) не произошло и после 120 циклов попеременных увлажнений и высушиваний.

Снижение прочности на 25 % в водонасыщенном состоянии у контрольных образцов, отформованных из всех исследуемых составов, фиксируется при меньшем количестве циклов увлажнений и высушиваний. При этом обращает на себя внимание тот факт, что прочность в водонасыщенном состоянии прессованного каустического магнезита в начале циклических испытаний несколько увеличивается, что наблюдалось и при испытании высушенных образцов, а затем резко падает по сравнению с гипсовыми образцами. При использовании в качестве модифицирующей добавки 15 % микрокремнезема (состав 2) снижение прочности на 25 % магнезитовых образцов наблюдается через 45 циклов испытаний, а в случае использования в этих целях 20 % тонкомолотой горелой породы (состав 3) – после 60 циклов. При этом прочность в водонасыщенном состоянии затвердевшего модифицированного гипсового вяжущего начинает плавно понижаться уже после первых циклов испытаний. При содержании в гипсовой смеси 20 % шлама химводоочистки ТЭЦ (состав 5) исходный коэффициент размягчения составляет 0,71, а снижение прочности водонасыщенных образцов на 25 % происходит после 75 циклов испытаний. В случае замены шламом 40 % материал становится менее водостойким (исходный коэффициент размягчения 0,63) и снижение его прочности в водонасыщенном состоянии происходит уже через 35 циклов увлажнения и высушивания, однако при последующих циклах испытаний уменьшение этого показателя замедляется.

Описанное выше увеличение прочности контрольных образцов в первый период циклических испытаний можно объяснить сложными физико-химическими процессами, происходящими в структуре прессованных материалов в процессе попеременных увлажнений и высушиваний. Протекающие процессы сопровождаются, по-видимому, увеличением удельной поверхности новообразований, что приводит к уплотнению структуры затвердевшего вяжущего камня и снижению его открытой пористости. В затвердевшем модифицированном магнезитовом камне это обусловлено частичным переходом аморфной фазы гидросиликатов магния в кристаллическую в виде труднорастворимых сепиолита и серпентина, а в гипсовом – дополнительной гидратацией полугидрата сульфата кальция, а также перекристаллизацией мелких кристаллов дигидрата в более крупные. В наших исследованиях это хорошо согласуется с представленным на рис. 2 изменением водопоглощения по массе образцов по мере нарастания числа циклов попеременных увлажнений и высушиваний. Сопоставляя результаты испытаний, представленные на рис. 1 и 2, можно проследить следующую закономерность: чем выше начальная прочность и водостойкость модифицированных прессованных композиций на основе воздушных вяжущих веществ, тем значительно увеличивается их прочность после первых циклов увлажнения и высушивания, что сопровождается снижением водопоглощения по массе.

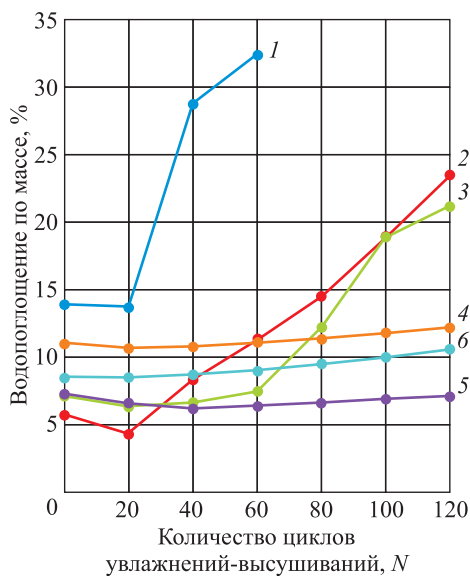


Рис. 2. Зависимость водопоглощения по массе образцов от числа циклов попеременного увлажнения и высушивания
1–6 – номера составов

Fig. 2. Dependence of water absorption by mass of samples on the number of cycles of alternating humidification and drying
1–6 – composition numbers

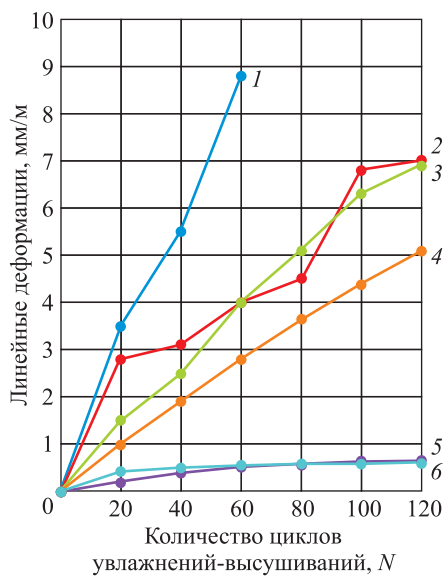


Рис. 3. Линейные деформации образцов при попеременных увлажнениях и высушиваниях
1–6 – номера составов

Fig. 3. Linear deformations of samples during alternating humidification and drying
1–6 – composition numbers

Описанными изменениями в структуре прессованных материалов, а также видом и характером новообразований можно объяснить то, что сброс прочности на 25 % у исследованных составов магнетитовых композитов наступает значительно раньше по сравнению с гипсовыми. Мелкокристаллическая структура затвердевшего дигидрата сульфата кальция, модифицированная дополнительным карбонатно-фосфатным каркасом, демонстрирует более заметное снижение прочности при увлажнении по сравнению со структурой прессованного каустического магнетита. Однако она проявляет способность полнее залечивать дефекты и микротрещины усталостного характера благодаря удалению свободной и адсорбционно-связанной воды при высушивании до постоянной массы. Наглядно это хорошо подтверждается результатами измерений линейных деформаций образцов-призм, представленных на рис. 3. Образцы-призмы, отформованные из тех же исследованных составов, подвергали циклическим увлажнениям и высушиваниям параллельно с определением прочности и водопоглощения модифицированных прессованных композитов на образцах-цилиндрах.

Согласно проведенным исследованиям, образцы, изготовленные прессованием из модифицированного гипсового вяжущего (составы 5 и 6), характеризуются незначительными необратимыми линейными деформациями, в несколько раз меньшими по сравнению с образцами из модифицированного каустического магнетита (составы 2 и 3). Следует также отметить, что у гипсовых образцов-призм, не содержащих комплексного модификатора (состав 4), необратимые линейные деформации оказались сопоставимы с де-

формациями образцов из модифицированного каустического магнезита (составы 2 и 3), но все-таки значительно ниже по сравнению с составом 1 (бездобавочный каустический магнезит). Это дополнительно указывает на способность структуры мелкокристаллического дигидрата сульфата кальция к залечиванию микродефектов, возникающих в результате циклических воздействий, и восстановлению прочности кристаллизационных контактов при высушивании.

На рис. 4 показано изменение рассчитанных коэффициентов размягчения и воздухоустойкости контрольных образцов по мере нарастания количества циклов попеременных увлажнений-высушиваний. Обращает на себя внимание различный характер поведения этих показателей долговечности пресованных гипсовых и магнезитовых композитов в процессе циклических испытаний. У модифицированных гипсовых композитов уже после первых циклов испытаний наблюдается плавное снижение коэффициента размягчения и после достижения минимальной величины, примерно после 80–90 циклов испытаний, этот показатель начинает увеличиваться (рис. 4, а). Это связано с тем, что при циклических увлажнениях-высушиваниях в ранний период испытаний прочность гипсовых композитов в высушенном состоянии снижается в меньшей степени, чем прочность в водонасыщенном. Коэффициент размягчения затвердевшего каустического магнезита, модифицированного как микрокремнеземом, так и горелой породой, наоборот возрастает в начале испытаний, что можно объяснить более значительным накоплением в материале усталостных напряжений, а затем после 50–70 циклов увлажнений-высушиваний происходит его резкое падение.

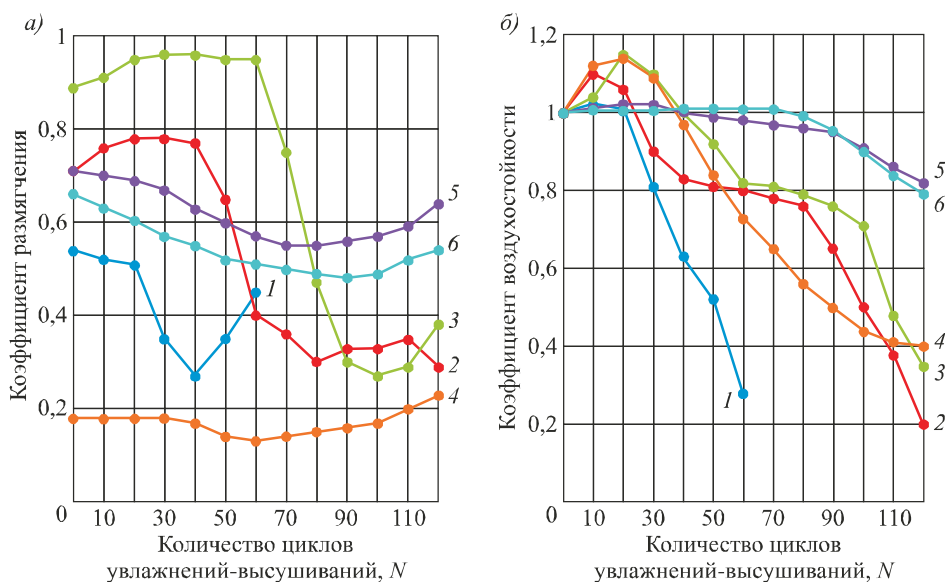


Рис. 4. Зависимость коэффициентов размягчения (а) и воздухоустойкости (б) от числа циклов попеременного увлажнения и высушивания

1–6 – номера составов

Fig. 4. Dependence of softening coefficients (a) and air resistance (b) on the number of cycles of alternating humidification and drying

1–6 – composition numbers

Описанные выше изменения физико-механических характеристик и структуры контрольных образцов обуславливают поведение коэффициента воздухоустойкости прессованных композитов на основе воздушных вяжущих веществ при попеременных увлажнениях-высушиваниях (рис. 4, б). У прессованных магнезитовых композитов, а также прессованного бездобавочного гипсового вяжущего коэффициент воздухоустойкости несколько возрастает в течение первых 10–20 циклов испытаний, а затем происходит его резкое снижение. Однако предлагаемый способ модификации магнезитового камня позволяет материалу примерно 40 циклов сохранять k_v выше 1,0. Коэффициент воздухоустойкости модифицированных гипсовых композитов остается почти неизменным на протяжении 80 циклов испытаний и только дальнейшее чередование увлажнения и высушивания приводит к заметному снижению этого показателя. Это еще раз свидетельствует о лучшей способности гипсовых композитов восстанавливать свою прочность при высыхании по сравнению с изначально более водостойким прессованным модифицированным каустическим магнезитом.

Заключение. Проведенные исследования показали, что предлагаемые способы модификации воздушных вяжущих веществ позволяют получать методом прессования прочные материалы, обладающие повышенной водо- и воздухоустойкостью. При этом выявлено, что более высокая водостойкость материала, оцениваемая по величине коэффициента размягчения, не обязательно гарантирует и его лучшее сопротивление попеременному увлажнению-высушиванию. Химический состав и характер кристаллизационной структуры затвердевшего искусственного гипсового камня обуславливают его лучшее сопротивление знакопеременным напряжениям при циклических воздействиях и, как следствие, усталостное разрушение модифицированных гипсовых композитов происходит медленнее в сравнении с магнезитовыми.

Разработанные составы прессованных магнезиальных и гипсовых композитов рекомендуются для производства мелкоштучных строительных изделий, используемых в ограждающих конструкциях зданий, а также в помещениях с влажностью более 60 %. Использование в качестве модифицирующих добавок значительного количества вторичных ресурсов в виде микрокремнезема, горелой породы и шлама химводоочистки ТЭЦ должно способствовать снижению себестоимости изделий, а также позволяет отнести предлагаемый способ их производства к наилучшим доступным технологиям.

Список источников

1. *Ферронская А.В.* Гипс в малоэтажном строительстве. М.: Изд-во АСВ, 2008. 240 с.
2. *Бурьянов А.Ф., Фишер Х.Б., Гальцева Н.А., Булдыжова Е.Н.* Исследование роли сульфата калия при проектировании активатора твердения // Строит. материалы. 2021. № 8. С. 34–38. DOI 10.31659/0585-430X-2021-794-8-34-38
3. *Khalil A.A., Tawfik A., Hegazy A.A.* Plaster Composites Modified Morphology with Enhanced Compressive Strength and Water Resistance Characteristics // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 167. P. 55–64. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.165
4. *Лотов В.А., Митина Н.А.* Получение водостойкого магнезиального вяжущего // Техника и технология силикатов. 2010. Т. 17, № 3. С. 19–22.

5. Garda-Trinanes P., Morgeneyer M., Casares J., Bao M. Use of organic byproducts as binders in the roll compaction of caustic magnesia // Powder Technology. 2012. Vol. 226. P. 173–179. DOI: 10.1016/j.powtec.2012.04.039
6. Domanskaya I., Bednyagin S., Fisher H.B. Water-resistant gypsum binding agents and concretes based thereof as promising materials for building green // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 177, no. 1. P. 012–029. DOI: 10.1088/1755-1315/177/1/012029
7. Каклюгин А.В., Ступень Н.С., Касторных Л.И., Коваленко В.В. Зависимость водостойкости прессованных материалов на основе воздушных вяжущих веществ от величины открытой пористости // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2020. Т.10, № 1. С. 68–75. DOI: 10.21285/2227-2917-2020-1-68-75
8. Chernykh T. Energy-saving magnesium oxychloride cement intensifier // SGEM International Multidisciplinary Scientific Conference on Social Sciences and Arts. 2015. Vol. 1. P. 359–363.
9. Петропавловская В.Б., Завадько М.Ю., Новиченкова Т.Б., Петропавловский К.С. Применение метакаолина и золы гидроудаления в безобжиговых гипсовых композитах // Строит. материалы. 2021. № 8. С. 11–17. DOI 10.31659/0585-430X-2021-794-8-11-17
10. Пудовкин А.Н., Юдин А.А., Ганеева Э.И., Парфенова А.А. Применение отходов гипсового производства в стеновых строительных материалах // Вестн. Евразийской науки. 2021. Т. 13, № 1. С. 12. <https://esj.today/PDF/48SAVN121.pdf>.
11. Kaklyugin A., Stupen N., Kastornykh L., Kovalenko V. Pressed composites based on gypsum and magnesia binders modified with secondary resources // Materials Science Forum. 2020. Vol. 1011. P. 52–58. DOI: 10.4038/www.scientific.net/MSF.1011.52
12. Митина Н.А., Лотов В.А., Кабанова В.В., Сухушина А.В. Особенности гидратации магнезиального цемента // Фундаментальные исследования. 2013. № 8. С. 676–680.
13. Li G., Yu H. Influence of Fly Ash and Silica Fume on Water-resistant Property of Magnesium Oxychloride Cement // Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed. 2010. No. 25. P. 721–724. DOI: 10.1007/s11595-010-0079-y
14. Каклюгин А.В., Касторных Л.И., Ступень Н.С., Коваленко В.В. Прессованные композиты на основе модифицированного гипсового вяжущего повышенной воздухоустойчивости // Строит. материалы. 2020. № 12. С. 40–46. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-787-12-40-46
15. Stupen N., Kaklyugin A., Kastornykh L., Kovalenko V. Pressed Magnesia Composites with Improved Weather Resistance Properties // Materials Science Forum. 2021. Vol. 1043. P. 27–35. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1043.27
16. Невский В.А. Усталость и деформативность бетона. М.: Вузовская книга, 2012. 264 с.

References

1. Ferronskaya A.V. Gypsum in low-rise construction. Moscow, 2008. 240 p. (In Russ.).
2. Buryanov A.F., Fisher Kh.B., Galtseva N.A., Buldyzhova E.N. Investigation of the role of potassium sulfate in the design of a hardening activator. *Stroitel'nyye materialy = Construction materials*. 2021; (8): 34–38. (In Russ.). DOI: 10.31659/0585-430X-2021-794-8-34-38
3. Khalil A.A., Tawfik A., Hegazy A.A. Plaster Composites Modified Morphology with Enhanced Compressive Strength and Water Resistance Characteristics. *Construction and Building Materials*. 2018; 167: 55–64. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.165
4. Lotov V.A., Mitina N.A. Obtaining water resistant magnesian binder. *Tekhnika i tekhnologiya silikatov = Technics and technology of silicates*. 2010; 17(3): 19–22. (In Russ.).

5. Garda-Trinanes P., Morgeneyer M., Casares J., Bao M. Use of organic byproducts as binders in the roll compaction of caustic magnesia. *Powder Technology*. 2012; 226: 173–179. DOI: 10.1016/j.powtec.2012.04.039
6. Domanskaya I., Bednyagin S., Fisher H.B. Water-resistant gypsum binding agents and concretes based thereof as promising materials for building green. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018; 177(1): 012–029. DOI: 10.1088/1755-1315/177/1/012029
7. Kaklyugin A.V., Stupen N.S., Kastornykh L.I., Kovalenko V.V. Dependence of water resistance of moulded materials containing air-setting binders on effective porosity. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2020; 10(1): 68–75. (In Russ.). DOI: 10.21285/2227-2917-2020-1-68-75
8. Chernykh T. Energy-saving magnesium oxychloride cement intensifier. *SGEM International Multidisciplinary Scientific Conference on Social Sciences and Arts*. 2015; 1: 359–363.
9. Petropavlovskaya V.B., Zavadko M.Yu., Novichenkova T.B., Petropavlovskiy K.S. The use of metakaolin and hydro removal ash in non-fired gypsum composites. *Stroitel'nyye materialy = Construction materials*. 2021; (8): 11–17. (In Russ.). DOI: 10.31659 / 0585-430X-2021-794-8-11-17
10. Pudovkin A.N., Yudin A.A., Ganeeva E.I., Parfenova A.A. The use of gypsum production waste in wall building materials. *Vestnik Evraziyskoy nauki = Bulletin of Eurasian Science*. 2021; 13(1): 12. (In Russ.). <https://esj.today/PDF/48SAVN121.pdf>
11. Kaklyugin A., Stupen N., Kastornykh L., Kovalenko V. Pressed composites based on gypsum and magnesia binders modified with secondary resources. *Materials Science Forum*. 2020; 1011: 52–58. DOI: 10.4038/www.scientific.net/MSF.1011.52
12. Mitina N.A., Lotov V.A., Kabanova V.V., Sukhushina A.V. Features of hydration of magnesian cement. *Fundamental'nyye issledovaniya = Fundamental research*. 2013; (8): 676–680. (In Russ.).
13. Li G., Yu H. Influence of Fly Ash and Silica Fume on Water-resistant Property of Magnesium Oxychloride Cement. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 2010; (25): 721–724. DOI: 10.1007/s11595-010-0079-y
14. Kaklyugin A.V., Kastornykh L.I., Stupen N.S., Kovalenko V.V. Press-formed composites with alternate wetting and drying resistance based on modified gypsum binder. *Stroitel'nyye materialy = Construction Materials*. 2020; (12): 40–46. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-787-12-40-46>
15. Stupen N., Kaklyugin A., Kastornykh L., Kovalenko V. Pressed Magnesia Composites with Improved Weather Resistance Properties. *Materials Science Forum*. 2021; 1043: 27–35. DOI 10.4028/www.scientific.net/MSF.1043.27
16. Nevskiy V.A. *Fatigue and deformability of concrete*. Moscow, 2012. 264 p. (In Russ.).

Информация об авторах

А.В. Каклюгин – кандидат технических наук, доцент
Н.С. Ступень – кандидат технических наук, доцент
Л.И. Касторных – кандидат технических наук, доцент
В.В. Коваленко – старший преподаватель

Information about the authors

A.V. Kaklyugin – PhD, Ass. Professor
N.S. Stupen – PhD, Ass. Professor
L.I. Kastornykh – PhD, Ass. Professor
V.V. Kovalenko – Senior Lecturer

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 10.12.2021
Одобрена после рецензирования 12.01.2022
Принята к публикации 17.01.2022

The article was submitted 10.12.2021
Approved after reviewing 12.01.2022
Accepted for publication 17.01.2022