

А.В. КАКЛЮГИН¹, канд. техн. наук (kaklugin@gmail.ru),
Л.И. КАСТОРНЫХ¹, канд. техн. наук (likas9@mail.ru);
Н.С. СТУПЕНЬ², канд. техн. наук (chemskorp@yandex.ru),
В.В. КОВАЛЕНКО², старший преподаватель (kvv0407@rambler.ru)

¹ Донской государственный технический университет (344022, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, 162)

² Брестский государственный университет им. А.С. Пушкина (224016, г. Брест, бульвар Космонавтов, 21, Республика Беларусь)

Прессованные композиты на основе модифицированного гипсового вяжущего повышенной воздухоустойкости

Водоустойкость природных и искусственных строительных материалов принято оценивать по величине коэффициента размягчения. Однако в процессе эксплуатации материалы, например для ограждающих конструкций зданий, крайне редко подвергаются полному обезвоживанию или водонасыщению. Поэтому одним из важнейших критериев долговечности таких изделий является их стойкость к атмосферным воздействиям (воздухоустойкость), оцениваемая путем проведения более жестких испытаний на попеременное увлажнение и высушивание. В настоящей работе изучена возможность повышения воздухоустойкости прессованных композитов на основе модифицированного гипсового вяжущего. Разработан комплексный модификатор гипсового вяжущего вещества и структуры получаемых прессованных композитов, состоящий из карбонатсодержащего шлама химводоочистки теплоэлектростанций и моноаммонийфосфата. Исследовано влияние модификатора на изменение прочности при сжатии прессованных композитов в высушенном и водонасыщенном состоянии, коэффициентов размягчения и воздухоустойкости, а также линейных деформаций контрольных образцов после установленного количества циклов попеременного увлажнения и высушивания. Установлено, что прессованные композиты на основе модифицированного гипсового вяжущего обладают высокой стойкостью к попеременному увлажнению-высушиванию. Комплексный модификатор обеспечивает формирование более прочной и монолитной структуры мелкокристаллического дигидрата сульфата кальция, дополнительно упрочненной труднорастворимым фосфатно-карбонатным каркасом. Предлагаемый способ модификации гипсового вяжущего препятствует расшатыванию структуры изготовленного из него прессованного камневидного материала при знакопеременных напряжениях, уменьшает линейные деформации и, как следствие, замедляет его усталостное разрушение. Технические характеристики полученных материалов являются достаточными для их использования, в частности в ограждающих конструкциях зданий.

Ключевые слова: гипсовые вяжущие вещества, водоустойкость, прессованные композиты, воздухоустойкость, шлам химводоочистки теплоэлектростанций, моноаммонийфосфат, наилучшие доступные технологии.

Для цитирования: Каклюгин А.В., Касторных Л.И., Ступень Н.С., Коваленко В.В. Прессованные композиты на основе модифицированного гипсового вяжущего повышенной воздухоустойкости // *Строительные материалы*. 2020. № 12. С. 40–46.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-787-12-40-46>

A.V. KAKLYUGIN¹, Candidate of Sciences (Engineering) (kaklugin@gmail.ru), L.I. KASTORNYKH¹, Candidate of Sciences (Engineering) (likas9@mail.ru);
N.S. STUPEN², Candidate of Sciences (Engineering) (chemskorp@yandex.ru), V.V. KOVALENKO², Senior lecturer (kvv0407@rambler.ru)

¹ Don State Technical University (162, Sotsialisticheskaya St., Rostov-on-Don, 344022, Russian Federation)

² Brest State A.S. Pushkin University (21, Kosmonavtov bul., Brest, 224016, Belarus)

Press- Formed Composites with Alternate Wetting and Drying Resistance Based on Modified Gypsum Binder

Water resistance of natural and artificial building materials is usually estimated by the softening coefficient. However, in the course of operation, materials, for example, for building enclosing structures, are rarely subjected to complete dewatering or water saturation. Therefore, one of the most important criteria for the durability of such products is their resistance to atmospheric influences (alternate wetting and drying resistance). In the present work, the possibility of increasing the alternate wetting and drying resistance of press-formed composites based on a modified gypsum binder is studied. We have developed a complex modifier of the gypsum binder and the structure of the resulting pressed composites, consisting of carbonate-containing slime of chemical water purification of thermoelectric power station and monoammonium phosphate. We studied the effect of the modifier on changes in the compressive strength of pressed composites in the dried and water-saturated state, softening and atmospheric durability coefficients, as well as linear deformations of control samples after a set number of cycles of alternating wetting and drying. We found that press-formed composites based on a modified gypsum binder are highly resistant to alternating wetting and drying. The complex modifier provides the formation of a more solid and monolithic structure of fine-crystalline calcium sulfate dihydrate, additionally reinforced with a hardly soluble phosphate-carbonate framework. The proposed method of modifying the gypsum binder prevents loosening of the structure of the press-formed stone-like material made from it under alternating stresses, reduces linear deformations and, as a result, slows down its fatigue failure. The technical characteristics of the obtained materials are sufficient for their use, in particular, in building enclosing structures.

Keywords: low-temperature calcined gypsum binder, water resistance, press-formed composites, alternate wetting and drying resistance, slime of chemical water purification of thermoelectric power station, monoammonium phosphate, best available technologies.

For citation: 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'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 12, pp. 40–46. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-787-12-40-46>

Технология изготовления гипсовых строительных изделий методом прессования из полусухих смесей заинтересовала многих исследователей и практиков еще в середине прошлого столетия. Их привлекала

прежде всего повышенная прочность получаемых прессованных композитов, а также возможность исключения из технологического процесса производства изделий длительной и энергозатратной искус-

ственной сушки [1, 2]. Несколько позднее результаты исследований научной школы проф. А.В. Волженского объяснили, что при содержании воды в формовочной смеси в количестве, близком к теоретически необходимому только для гидратации вяжущего вещества, в прессованном искусственном камне формируется высокопрочная мелкокристаллическая структура дигидрата сульфата кальция. В отсутствие излишка жидкой фазы в системе исключается перекристаллизация высокодисперсных новообразований в более крупные кристаллы, обладающие пониженной связующей способностью [3, 4]. Однако в настоящее время метод уплотнения формовочных смесей прессованием в технологии производства гипсовых изделий имеет ограниченное применение. Несмотря на технологичность и высокую прочность прессованных гипсовых кирпичей, стеновых камней, многпустотных замковых блоков и облицовочных плит, более широкое распространение данного метода формования сдерживают, с одной стороны, повышенный расход вяжущего вещества на 1 м³ готовой продукции, а с другой — низкая водостойкость самих изделий. С целью устранения указанных недостатков авторами разработан комплексный модификатор гипсового вяжущего вещества и структуры получаемых прессованных композитов, состоящий из карбонатсодержащего наполнителя — шлама химводоочистки ТЭЦ и однозамещенной соли ортофосфорной кислоты — моноаммонийфосфата (NH₄H₂PO₄). В результате химического взаимодействия моноаммонийфосфата с сульфатом кальция вяжущего и карбонатом кальция наполнителя на поверхности частиц гидратных новообразований и зерен шлама образуются экранирующие фазовые пленки из труднорастворимого дигидрата дикальцийфосфата (CaHPO₄·2H₂O). Это соединение является изоморфным с двуводным гипсом, обладает по сравнению с ним в 10 раз меньшей растворимостью и изменяет характер кристаллизационной структуры прессованного материала. Пленки из труднорастворимого фосфата кальция на элементах кристаллизационной структуры материала оказывают на нее дополнительное цементирующее действие, способствуют повышению ее прочности и водостойкости [5, 6]. Следует также отметить, что образование этих пленок на поверхности зерен гипсового вяжущего в начальный период его твердения значительно замедляет гидратацию, что является положительным технологическим фактором при формировании изделий из смесей с низкими водогипсовыми отношениями. Выявлена возможность замены значительного количества гипсового вяжущего вещества в формовочных смесях (до 40%) на шлам химводоочистки ТЭЦ. Прессованные композиты на основе модифицированного вяжущего при этом сохраняют высокую механическую прочность, но приобретают повышенную водостойкость, а использование в качестве одного из компонентов комплексного модификатора вторичного ресурса обуславливает снижение себестоимости изделий и по-

зволяет отнести предлагаемый способ их производства к наилучшим доступным технологиям [7, 8].

Водостойкость природных и искусственных строительных материалов принято оценивать по величине коэффициента размягчения, вычисляемого как соотношение их прочности при сжатии в водонасыщенном и сухом состоянии. Проблема повышения водостойкости гипсовых материалов и изделий с целью расширения их использования в строительстве на протяжении многих лет находится в центре внимания отечественных и зарубежных исследователей [9]. На практике при решении этой задачи наибольших успехов удалось достичь за счет разработки составов смешанных гипсовых вяжущих веществ — гипсоцементно-пуццоланового, гипсошлакоцементно-пуццоланового и гипсоизвестково-шлакового [10, 11]. При этом известно, что низкая водостойкость затвердевшего дигидрата сульфата кальция без гидравлических добавок обусловлена его значительной растворимостью (около 2 г на 1 л воды), ослабляющей связи между кристаллами искусственного камня при увлажнении [12], а также расклинивающим действием на структуру материала водных пленок, адсорбирующихся на внутренних поверхностях микротрещин и пор [13]. Кроме того, результаты предыдущих исследований авторов показывают, что водостойкость прессованных композитов на основе воздушных вяжущих веществ особенно тесно связана с величиной их остаточной открытой пористости. Независимо от вида и количества модифицирующих добавок, значения водогипсового отношения и величины прессующего давления коэффициент размягчения прессованного материала уменьшается пропорционально увеличению его открытой пористости [14].

Однако, по мнению многих ученых [15, 16], нельзя судить о долговечности мелкоштучных стеновых изделий на основе воздушных вяжущих веществ только на основании оценки коэффициента размягчения. Следует учитывать, что в процессе эксплуатации такие материалы крайне редко подвергаются полному обезвоживанию или водонасыщению, а в представленном случае прессованные композиты на основе модифицированного гипсового вяжущего даже при значениях коэффициента размягчения 0,6–0,7 сохраняют достаточно высокую прочность при сжатии в водонасыщенном состоянии [5, 6]. Поэтому, по мнению авторов, одним из важнейших критериев долговечности строительных материалов и изделий для ограждающих конструкций зданий является их стойкость к атмосферным воздействиям (воздухостойкость), оцениваемая путем проведения более жестких испытаний на попеременное увлажнение и высушивание. 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, появле-

нием значительных растягивающих и скалывающих напряжений.

В настоящей работе представлены результаты исследований по оценке воздухоустойчивости прессованных композитов на основе низкомарочного гипсового вяжущего β -модификации, повышение водостойкости которого было достигнуто за счет совместного введения в его состав карбонатсодержащего шлама химводоочистки теплоэлектростанций и моноаммонийфосфата.

Материалы и методы

В экспериментальных исследованиях применяли гипсовое вяжущее Г-5 Б II по ГОСТ 125–2018.

В качестве первого компонента комплексного модификатора гипсового вяжущего использовали тонкодисперсный наполнитель – шлам химводоочистки ТЭЦ-2 г. Ростова-на-Дону, образующийся при смягчении речной воды гашеной известью и содой. Содержащиеся в воде гидрокарбонаты кальция и магния в процессе ее смягчения переходят в нерастворимый осадок. После осаждения и фильтрации шлам в количестве до 15 т в сутки выбрасывается в отвал. Высушенный наполнитель представляет собой порошок желтоватого цвета с удельной поверхностью $780 \text{ м}^2/\text{кг}$, состоящий, согласно данным химического, дериватографического и ряда других анализов, на 75% из карбоната кальция. Роль второго компонента комплексного модификатора играл моноаммонийфосфат (однозамещенный фосфат аммония). Эту соль получают в результате нейтрализации ортофосфорной кислоты аммиаком и широко применяют в сельском хозяйстве в качестве минерального удобрения. В водных растворах моноаммонийфосфат образует кислую среду с $\text{pH}=3,8$, поскольку кроме гидролиза этой соли одновременно происходит диссоциация дигидрофосфат-иона (H_2PO_4^-), преобладающая над процессом гидролиза.

Приготовление исследуемых сырьевых смесей осуществляли на лабораторной бегунковой растворешалке. Продолжительность перемешивания увлажненной формовочной смеси устанавливали опытным путем и варьировали в пределах от 2 до 20 мин [17]. Оценку стойкости материалов к попеременному увлажнению-высушиванию проводили на образцах-цилиндрах высотой и диаметром 50,5 мм. Образцы изготавливали методом прессования под давлением 40 МПа в специальных пресс-формах из формовочных смесей нескольких составов. Перед испытаниями образцы 28 сут твердели в воздушно-сухих условиях, а затем их высушивали в сушильном шкафу до постоянной массы при температуре $55 \pm 2^\circ\text{C}$.

Стойкость образцов к попеременному увлажнению-высушиванию изучали следующим образом. Сначала образцы в течение 3 ч выдерживали в воде при температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$, а затем в течение 15 ч на воздухе с такой же температурой. После этого их высушивали в течение 6 ч в сушильном шкафу при температуре $55 \pm 2^\circ\text{C}$. Указанные операции по водонасы-

щению 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 для физико-механических испытаний отбирали по 10 образцов, половину которых испытывали в высушенном до постоянной массы состоянии, а остальные – в водонасыщенном. По показателям прочности образцов при сжатии определяли коэффициенты размягчения и воздухоустойчивости. Последний вычисляли как частное 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 воздухоустойчивости остается не менее 0,75.

Возникновение и развитие необратимых деформаций при попеременных увлажнениях-высушиваниях изучали на образцах-призмах размером $40 \times 40 \times 160$ мм, в торцах которых в процессе формирования 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 деформаций в одних и тех же точках. Контроль надежности измерений и учет температурных погрешностей обеспечивали с помощью стального эталона, имеющего такие же геометрические характеристики, как 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 попеременного увлажнения и высушивания.

Результаты и их обсуждение

Оценку стойкости прессованных композитов на основе модифицированного гипсового вяжущего к попеременному увлажнению и высушиванию проводили с использованием контрольных образцов, отформованных из смесей, составы которых в предварительных опытах показали наилучшие результаты по прочности при сжатии и водостойкости. Составы исследуемых формовочных смесей приведены в табл. 1, а физико-механические характеристики отформованных их образцов – в табл. 2.

Характер изменения прочности при сжатии образцов в сухом и водонасыщенном состоянии по мере увеличения числа циклов попеременного увлажнения-высушивания представлен на рис. 1.

Таблица 1
Table 1Составы формовочных смесей
The compositions of the molding compounds

Номер состава	Содержание компонентов, мас. %		Добавка моноаммоний-фосфата, сверх 100 %	Водо-твердое отношение
	Гипсовое вяжущее	Шлам химводо-очистки ТЭЦ		
1	100	0	0	0,52
2	100	0	0	0,19
3	80	20	2	0,17
4	80	20	2	0,185
5	80	20	2	0,2
6	60	40	2	0,17

Из полученных данных видно, что механическая прочность образцов всех составов уменьшается по мере нарастания числа циклов испытаний. Однако наиболее заметно снижение прочности у образцов составов 1 и 2, т. е. изготовленных соответственно из гипсового теста нормальной густоты и прессованного гипсового вяжущего без добавок. Прессованные образцы с добавками шлама химводоочистки и моноаммонийфосфата (составы 3–6) оказались значительно более стойкими к попеременному увлажнению и высушиванию. Так, если принять допустимое снижение начальной прочности материала в процессе циклических испытаний не более чем на 25%, то по показателям прочности в высушенном состоянии образцы 1-го состава выдержали 65 циклов испытаний, 2-го состава – 55 циклов, 3-го и 5-го составов – 115 циклов, а указанного снижения прочности 4-го и 6-го составов не произошло и после 120 циклов попеременных увлажнений и высушиваний. Следует отметить, что снижение прочности образцов на 25% в водонасыщенном состоянии фиксируется при меньшем числе циклов увлажнения и высушивания. У образцов 1-го и 2-го составов оно наступает соответственно через 60 и 25 циклов испытаний, 3-го состава – через 65 циклов, 4-го и 5-го составов – через 75 циклов. Снижение прочности при сжатии в водонасыщенном состоянии образцов, отформованных из 6-го состава, содержащего наибольшее количество

шлама химводоочистки, происходит уже через 35 циклов испытаний, однако при последующих циклах испытаний уменьшение этого показателя замедляется. Как видно из рис. 1, прочность сухих и водонасыщенных образцов 2, 3, 4 и 5-го составов в первые 20 циклов испытаний несколько увеличивается. Наиболее это заметно у образцов 3-го состава, прочность в высушенном состоянии которых увеличивается на 15%. Однако при нарастании числа циклов попеременных увлажнений-высушиваний этот состав, содержащий около 5% негидратированного вяжущего, характеризуется наибольшим сбросом прочности по сравнению с образцами 4-го и 5-го составов.

Отмеченное увеличение прочности образцов указанных выше составов можно объяснить сложными физико-химическими процессами, происходящими в структуре прессованного материала при попеременных увлажнениях-высушиваниях. Они связаны с дополнительной гидратацией полугидрата сульфата кальция, а также перекристаллизацией мелких кристаллов дигидрата в более крупные. Происходящие процессы сопровождаются, по-видимому, увеличением удельной поверхности новообразований, что приводит к уплотнению структуры затвердевшего камня и снижению его открытой пористости. В исследованиях авторов это хорошо согласуется с представленным на рис. 2 изменением водопоглощения по массе образцов по мере нарастания числа циклов попеременных увлажнений и высушиваний.

Водопоглощение образцов 3-го состава до начала испытаний составляло 7,3%. Через 20 циклов испытаний оно понизилось до 6,5%, еще через 10 циклов до 6,2%, а в дальнейшем наблюдается рост водопоглощения образцов этого состава. Менее заметно через 20 циклов увлажнений-высушиваний уменьшается водопоглощение образцов 2-го и 4-го составов, а у 1, 5 и 6-го составов в эти сроки оно остается неизменным.

Сопоставляя данные изменения прочности образцов (рис. 1) и их водопоглощения по массе (рис. 2) с увеличением числа циклов испытаний, можно проследить закономерность: чем больше прирост прочности материала в первые циклы испытаний, тем заметнее снижается его водопоглощение по массе, тем раньше в дальнейшем наступает 25% сброс прочности исследуемых образцов.

Таблица 2
Table 2Физико-механические характеристики исследуемых модифицированных вяжущих
Physical and mechanical characteristics of the modified binders under study

Номер состава	Предел прочности при сжатии, МПа, образцов		Коэффициент размягчения	Средняя плотность, кг/м ³	Водопоглощение, %	Открытая пористость, %
	сухих	водонасыщенных				
1	10,8	5,7	0,53	1200	28,4	34
2	32	5,3	0,17	1800	11	19,8
3	59,5	38,2	0,64	1930	7,3	14
4	61,7	44	0,71	1950	5,8	11,3
5	54,5	36,5	0,67	1940	8	15,5
6	46,8	29,5	0,63	1860	8,5	15,8

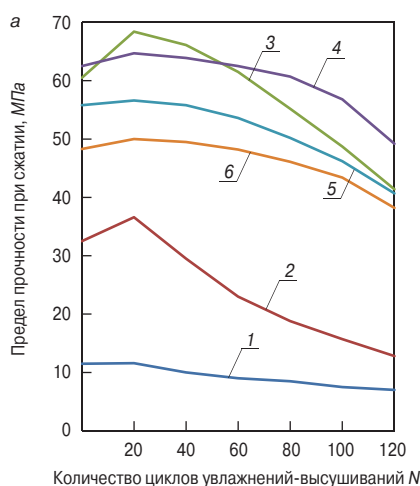


Рис. 1. Зависимость прочности образцов при сжатии в высушенном (а) и водонасыщенном (б) состоянии от числа циклов попеременного увлажнения и высушивания: 1–6 – номера составов

Fig. 1. The dependence of the compressive strength of samples in the dried (a) and water-saturated (b) state on the number of cycles of alternate wetting and drying: 1–6 – composition numbers

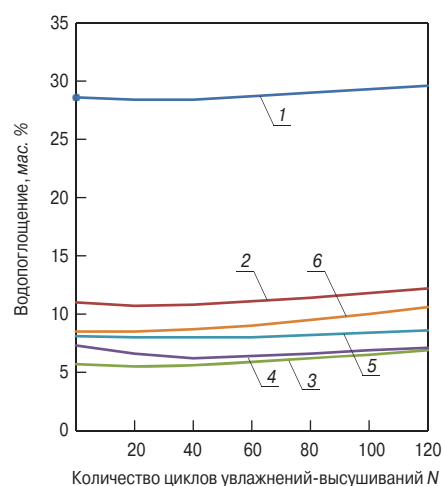
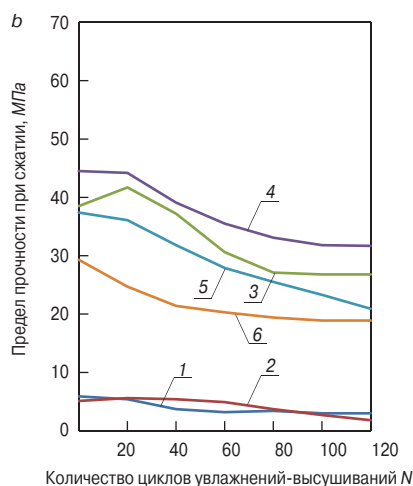


Рис. 2. Зависимость водопоглощения по массе образцов от числа циклов попеременного увлажнения и высушивания: 1–6 – номера составов

Fig. 2. The dependence of water absorption by mass of samples on the number of cycles of alternate wetting and drying: 1–6 – composition numbers

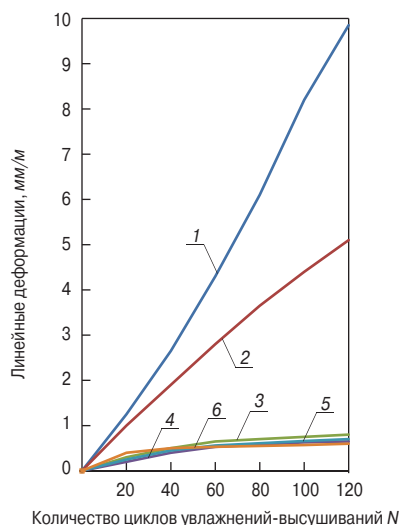


Рис. 3. Линейные деформации образцов при попеременном увлажнении и высушивании: 1–6 – номера составов

Fig. 3. The linear deformations of samples during wetting and drying: 1–6 – composition numbers

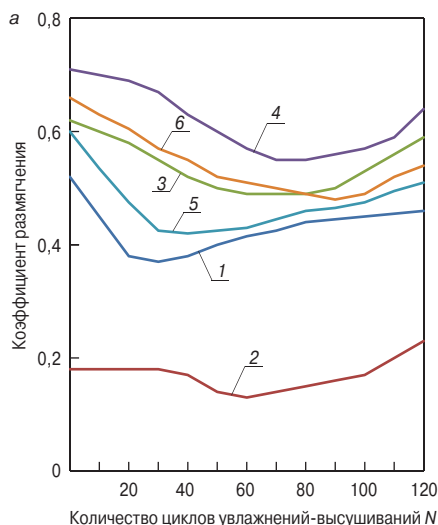
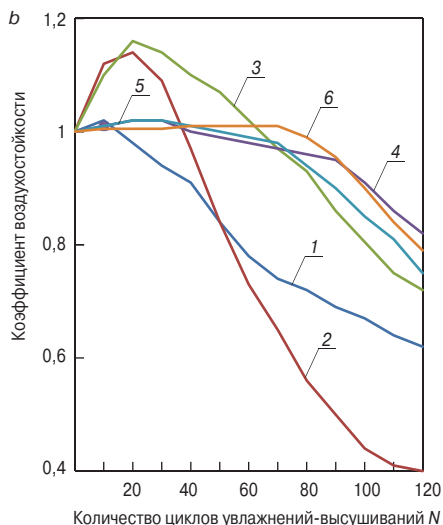


Рис. 4. Зависимость коэффициентов размягчения (а) и воздушостойкости (б) от числа циклов попеременного увлажнения и высушивания: 1–6 – номера составов

Fig. 4. Dependence of the softening (a) and atmospheric durability (b) coefficients on the number of cycles of alternate wetting and drying: 1–6 – composition numbers



Изменение свойств исследованных составов сопровождается линейными деформациями образцов-призм, которые представлены на рис. 3. Они связаны с описанными ранее физико-химическими процессами, происходящими в структуре материалов, а также с развитием дефектов и микротрещин усталостного характера. В результате проведенных исследований установлено, что образцы, изготовленные прессованием из модифицированных вяжущих (составы 3–6), характеризуются необратимыми линейными деформациями на порядок меньше, чем образцы из чистого прессованного гипсового вяжущего (состав 2), а также образцы из гипсового теста нормальной плотности. Это, по-видимому, связано с особенностями их структуры, вызванными примени-

ем добавок карбонатного тонкодисперсного наполнителя и однозамещенного фосфата аммония, появлением в структуре материала дополнительного фосфатно-карбонатного каркаса. Наиболее сильно линейные деформации составов с добавками шлама химводоочистки и моноаммонийфосфата проявляются в первые 20–30 циклов попеременных увлажнений-высушиваний, а затем скорость их нарастания понижается. Ранее отмечалось, что в этот период испытаний у образцов большинства составов отмечается рост механической прочности и уменьшение водопоглощения по массе. Это позволяет предположить, что увеличение линейных размеров образцов вызвано дополнительной гидратацией и перекристаллизацией гипса, происходящих в первые циклы

попеременных увлажнений-высушиваний и сопровождающихся некоторым объемным расширением. Подтверждением данного факта является и то, что наибольшие линейные деформации зафиксированы у образцов 3-го состава, которые, как уже отмечалось ранее, содержали до 5% негидратированного вяжущего. Как видно из рис. 3, необратимые линейные деформации прессованного гипсового вяжущего без добавок (состав 2) и литых образцов (состав 1) нарастают лавинообразно и сопровождаются снижением прочности, водостойкости и ростом водопоглощения, что указывает на крайне низкую стойкость указанных составов при попеременных увлажнении-высушиваниях.

Описанные изменения механической прочности материала в сухом и водонасыщенном состоянии с увеличением числа циклов попеременных увлажнений-высушиваний наиболее наглядно можно проследить на рис. 4, где показано изменение рассчитанных коэффициентов размягчения и воздухостойкости исследованных составов.

Как видно из рис. 4, *a*, коэффициент размягчения для всех составов при попеременном увлажнении-высушивании сначала понижается, а достигнув минимальной величины при различном количестве циклов испытаний, начинает увеличиваться. Так, наибольшей величиной коэффициента размягчения до начала испытаний обладает 4-й состав ($K_p=0,71$). Через 90 циклов попеременных увлажнений-высушиваний коэффициент размягчения этого состава понизился до 0,54, а после 120 циклов составил 0,63. Своего минимального значения коэффициенты размягчения 3, 5 и 6-го составов достигают соответственно через 65, 90 и 40 циклов испытаний (0,48; 0,48 и 0,43). Через 120 циклов увлажнений-высушиваний коэффициент размягчения указанных составов вновь повысился соответственно до 0,59; 0,51 и 0,5. Это связано с тем, что при циклических увлажнении-высушиваниях в первые сроки испытаний

прочность модифицированных гипсовых вяжущих в высушенном состоянии снижается в меньшей степени, чем в водонасыщенном. При увеличении количества испытаний в образцах накапливаются усталостные напряжения, не позволяющие им восстанавливать прочность при высыхании.

Выводы

Проведенные исследования показали, что прессованные композиты из модифицированного гипсового вяжущего обладают высокой стойкостью к попеременному увлажнению-высушиванию в сравнении с образцами из гипсового вяжущего без добавок и тем более с образцами, отформованными из гипсового теста нормальной густоты (рис. 4, *b*). Это объясняется тем, что, как установлено в предыдущих исследованиях [5, 6], прессованные композиты на основе модифицированного гипсового вяжущего обладают более прочной, монолитной мелкокристаллической структурой, дополнительно упрочненной фосфатно-карбонатным каркасом. Введение в состав формовочной массы карбонатного тонкодисперсного наполнителя совместно с моноаммонийфосфатом улучшает показатели пористости и структуру материала, способствует образованию на кристаллах дигидрата сульфата кальция экранирующих фазовых пленок из труднорастворимых фосфатов кальция, снижающих растворение кристаллизационных контактов [6, 14]. Предлагаемый способ модификации гипсового вяжущего препятствует расшатыванию структуры изготовленного из него прессованного камневидного материала при знакопеременных напряжениях, уменьшает линейные деформации и, как следствие, замедляет его усталостное разрушение. Использование вторичного ресурса в составе комплексного модификатора гипсового вяжущего позволяет снизить себестоимость прессованных изделий на его основе, а способ их производства отнести к наилучшим доступным технологиям.

Список литературы

1. Гецелев А.В. Изделия высокой механической прочности на базе штукатурного гипса // *Промышленность строительных материалов*. 1946. № 6. С. 46–50.
2. Крыжановский Б.Б., Левитина М.В., Смирнов Н.В. Освоение метода полусухого прессования гипсовых строительных деталей. *Сборник трудов РОСНИИМС*. 1954. № 6. С. 189–208.
3. Волженский А.В., Рожкова К.Н. Структура и прочность дигидрата, образующегося при гидратации полуводного гипса // *Строительные материалы*. 1972. № 5. С. 26–28.
4. Волженский А.В. Зависимость прочности вяжущих от их концентрации в твердеющей смеси с водой // *Строительные материалы*. 1974. № 6. С. 26–28.

References

1. Getselev A.V. Products of high mechanical strength based on plaster. *Promyshlennost' stroitel'nykh materialov*. 1946. No. 6, pp. 46–50. (In Russian).
2. Kryzhanovsky B.B., Levitina M.V., Smirnov N.V. Mastering the method of semi-dry pressing of gypsum building parts. *Collection of scientific works of ROSNIIMS*. Moscow: Promstroyizdat, 1954. No. 6, pp. 189–208.
3. Volzhensky A.V., Rozhkova K.N. The structure and strength of the dihydrate formed during the hydration of semiaqueous gypsum. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 1972. No. 5, pp. 26–28. (In Russian).
4. Volzhensky A.V. Dependence of the strength of binders on their concentration in a hardening mixture with water. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 1974. No. 6, pp. 26–28. (In Russian).

5. Юндин А.Н., Каклюгин А.В., Акопджанов Р.Г. Увеличение прочности и водостойкости прессованного строительного гипса. *Эффективные технологии и материалы для стеновых и ограждающих конструкций: Материалы международной научно-практической конференции (12–15 декабря 1994 г.)*. Ростов н/Д: Рост. гос. академия строительства, 1994. С 87–92.
6. 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, pp. 52–58. DOI: 10.4038/www.scientific.net/MSF.1011.52.
7. Каклюгин А.В., Трищенко И.В. Наилучшие доступные технологии в производстве строительных материалов и изделий. *Строительство и архитектура – 2017. Инженерно-строительный факультет: Материалы научно-практической конференции*. Ростов н/Д: ДГТУ, 2017. С. 185–191.
8. Трищенко И.В., Каклюгин А.В. Об оценке эффективности инвестиций в инновационные направления развития промышленности строительных материалов // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2018. Т. 8. № 2 (8). С. 73–83. DOI: 10.21285/2227-2917-2018-2-73-83.1.
9. Коровяков В.Ф. Гипсовые вяжущие и их применение в строительстве // *Российский химический журнал*. 2003. Т. XLVII. № 4. С. 18–25.
10. Волженский А.В., Стамбулко В.И., Ферронская А.В. Гипсоцементно-пуццолановые вяжущие, бетоны и изделия. М.: Стройиздат, 1971. 318 с.
11. Коровяков В.Ф. Перспективы производства и применения в строительстве водостойких гипсовых вяжущих и изделий // *Строительные материалы*. 2008. № 3. С. 65–67.
12. Будников П.П. Гипс, его исследование и применение. М.: Стройиздат, 1951. 418 с.
13. Ребиндер П.А. Физико-химические основы водопроницаемости строительных материалов. М.: Госстройиздат, 1953. 184 с.
14. 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.
15. Ферронская А.В. Долговечность гипсовых материалов, изделий и конструкций. М.: Стройиздат, 1984. 286 с.
16. Невский В.А. Усталость и деформативность бетона. М.: Вузовская книга, 2012. 264 с.
17. Патент РФ № 2078745. Сырьевая смесь для изготовления гипсовых изделий и способ ее приготовления / А.В. Каклюгин, А.Н. Юндин. Опубл. 10.05.1997.
5. Yundin A.N., Kaklyugin A.V., Akopdzhanov R.G. Increasing the strength and water resistance of pressed gypsum binder. *Effective technologies and materials for wall and enclosing structures: Materials of the international scientific and practical conference (December 12–15, 1994)*. Rostov-on-Don: RSACE, 1994, pp. 87–92. (In Russian).
6. 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, pp. 52–58. DOI: 10.4038/www.scientific.net/MSF.1011.52.
7. Kaklyugin A.V., Trishchenko I.V. The best available technologies in the production of building materials and products. *Construction and architecture – 2017. Engineering and construction faculty: Materials of the scientific and practical conference*. Rostov-on-Don: DSTU, 2017, pp. 185–191. (In Russian).
8. Trishchenko I.V., Kaklyugin A.V. Effectiveness of investments in the innovative directions of the construction materials industry. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*. 2018. Vol. 8. No. 2, pp. 73–83. (In Russian). DOI: 10.21285/2227-2917-2018-2-73-83.1.
9. Korovyakov V.F. Gypsum binders and their use in construction. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*. 2003. Vol. XLVII. No. 4, pp. 18–25. (In Russian).
10. Volzhensky A.V., Stambulko V.I., Ferronskaya A.V. Gipsosementnoputstsolanovyie vyazhushchiye, betony i izdeliya [Gypsum-cement-pozzolanic binders, concretes and products]. Moscow: Stroyizdat, 1971. 318 p.
11. Korovyakov V.F. Prospects for the production and use in construction of water-resistant gypsum binders and products. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2008. No. 3, pp. 65–67. (In Russian).
12. Budnikov P.P. Gips, yego issledovaniye i primeneniye [Gypsum, its research and application]. Moscow: Stroyizdat, 1951. 418 p.
13. Rebinder P.A. Fiziko-khimicheskiye osnovy vodopronitsayemosti stroitel'nykh materialov [Physicochemical basis for the water permeability of building materials]. Moscow: Gosstroyizdat, 1953. 184 p.
14. 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'*. 2020. Vol. 10. No. 1, pp. 68–75. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2020-1-68-75>.
15. Ferronskaya A.V. Dolgovechnost' gipsovykh materialov, izdeliy i konstruktsiy [Durability of gypsum materials, products and structures]. Moscow: Stroyizdat, 1984. 286 p.
16. Nevsky V.A. Ustalost' i deformativnost' betona [Fatigue and deformability of concrete]. Moscow: Vuzovskaya kniga, 2012. 264 p.
17. Patent RF No. 2078745 Syr'yevaya smes' dlya izgotovleniya gipsovykh izdeliy i sposob yeye prigotovleniya. [Raw meal for manufacturing gypsum products and method of preparation thereof]. Kaklyugin A.V., Yundin A.N. 1997. (In Russian).