

Научная статья

УДК 691.223.7

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-3-227-234>

CC BY 4.0

Влияние температурно-влажностной обработки на набор прочности мелкозернистого бетона с добавкой сапонитсодержащего материала

Марина Владимировна Морозова 

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия

e-mail: m.morozova@narfu.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Для восстановления и развития дорожной сети Соловецких островов могут быть использованы бетонные плиты. В настоящее время для улучшения эксплуатационных характеристик дорожных плит активно внедряются составы с добавками отходов производств, в том числе микро- и наноуровня. Для Архангельской области в качестве такого материала может применяться сапонитсодержащий отход горнодобывающей промышленности. При этом одним из способов ускорения процесса набора прочности композитов является пропаривание. Однако исследования, связанные с влиянием температурно-влажностной обработки на процесс твердения композита с высокодисперсным сапонитсодержащим материалом (ССМ), ранее не был изучен. Известно, что процесс сорбции влаги высокодисперсной добавкой позволяет управлять структурообразованием при твердении бетона, улучшая его эксплуатационные характеристики. Однако в условиях повышенной влажности количественное содержание воды затворения, рассчитанное исходя из величины водопоглощения ССМ, может значительно измениться и оказать влияние на процесс набора прочности композита. Поэтому **целью данной работы** является изучение влияния температурно-влажностной обработки на набор прочности мелкозернистого бетона с добавкой ССМ. Установлено, что ускоренный метод твердения бетона оказывает только положительный эффект на формирование прочной и плотной структуры. Однако в случае использования в качестве добавки высокодисперсного сапонитсодержащего материала может наблюдаться и обратный эффект (снижение прочности), связанный с сорбционными свойствами и особенностями его структуры. **Методы и материалы.** Выделенный из оборотной воды ССМ высушивали до постоянной массы и диспергировали на планетарной шаровой мельнице. Размер частиц определяли методом измерения динамического и электрофоретического светорассеяния, а величину удельной поверхности – методом сорбции азота (теория БЭТ). Набор прочности образцов мелкозернистого бетона контрольного и опытного (с добавкой ССМ) составов осуществляли двумя способами: в нормальных условиях и ускоренным методом с помощью пропаривания. Испытания на прочность образцов-кубов размером 70×70×70 мм проводили на автоматическом испытательном прессе по ГОСТ 10180. Исследование микроструктуры образцов осуществляли методом растровой электронной микроскопии. **Результаты и обсуждение.** Выделенный, высушенный и измельченный сапонитсодержащий материал (в виде порошка) обладал средним размером частиц 445 ± 40 нм и удельной поверхностью 50670 ± 10 м²/кг. В продолжение исследований были изготовлены контрольные (МЗБ) и опытные образцы мелкозернистого бетона (МЗБ_{ССМ}). Количество высокодисперсной добавки вводили в бетонную смесь на основе ранее полученных результатов кинетических исследований процесса водопоглощения сапонитсодержащего материала. Определение прочностных характеристик 1-МЗБ и 1-МЗБ_{ССМ} твердеющих в нормальных условиях, проводили на 28 суток. Образцы 2-МЗБ и 2-МЗБ_{ССМ} спустя сутки после затворения водой помещали в пропарочную камеру. По истечении времени выдержки их постепенно охлаждажали и определяли прочностные характеристики. Установлено, что ускоренный способ набора прочности мелкозернистого бетона путем пропаривания положительно действует только на контрольные образцы. Для композита с добавкой ССМ температурно-влажностная обработка оказывает противоположное действие. Так, динамика набора прочности 1-МЗБ и 1-МЗБ_{ССМ} имеет однотипный характер. В начальный момент времени наблюдается активный участок набора прочности, но на 7 сутки прочность при сжатии у образцов опытного состава на 40% выше, чем у контрольного. При ускоренном способе твердения в первые два часа (стадия изотермического прогрева) наблюдался активный участок повышения прочности у 2-МЗБ и 2-МЗБ_{ССМ}. Последующее твердение контрольных образцов имеет линейную зависимость с постепенным повышением прочности до проектной за шесть часов. Для 2-МЗБ_{ССМ} спустя два часа пропаривания прочность резко начинает снижаться, а спустя шесть часов – наступает видимое разрушение структуры бетона. Следовательно, продолжительное температурно-влажностное воздействие на бетон с высокодисперсной добавкой ССМ приводит к снижению прочностных характеристик образцов. Вероятнее всего, это связано с перенасыщением влагой структуры композита. Поэтому в продолжение исследований были сделаны электронные фотографии микроструктуры

© Морозова М.В., 2024

бетона после трехчасового выдерживания в пропарочной камере. Так, микроструктура 2-МЗБ_{ССМ} в основном, представлена губчатыми частицами, а количество образовавшихся игольчатых (кристаллов тоберморита) значительно уменьшилось по сравнению с контрольным. Наблюдается также значительное образование в опытном образце пустот, которые можно отнести к дефектам структуры полученного композита. Кроме того, сапонит имеет трехслойную кристаллическую структуру, а расстояние между ее пакетами может легко изменяться, так как связь между ними обуславливают только силы Ван-дер-Ваальса. Это может приводить к значительному набуханию ССМ под действием влаги и создавать избыточное давление в микроструктуре твердеющего мелкозернистого бетона, вызывая разрушение внутренней структуры с последующим снижением прочностных характеристик. Поэтому в продолжение исследований был выполнен следующий эксперимент: навеску сапонитсодержащего материала помещали в стеклянный мерный цилиндр и добавляли в него воды. Полученные данные по набуханию показали, что все пробы высокодисперсного сапонитсодержащего материала активно поглощали воду. Так, через 30 минут материал увеличился в объеме в 3,6 раза, а спустя три часа – в 5,5 раза, по сравнению с первоначальным. **Заключение.** Важный практический вывод представленных экспериментальных результатов являет следующее положение: в случае использования высокодисперсной добавки сапонитсодержащего материала для получения мелкозернистого бетона, нельзя менять условия твердения образцов с нормальных на ускоренный способ путем их пропаривания. В последнем случае после выдержки опытных проб при температурно-влажностном воздействии в течение двух-трех часов происходит потеря их прочностных качеств. Данный факт связан с процессами насыщения частиц сапонита водой и последующим их значительным набуханием.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сапонитсодержащий материал, пропаривание, температурно-влажностная обработка, мелкозернистый бетон, высокодисперсная добавка, набухание, прочность на сжатие.

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта 23-13-20013 «Грунтобетоны на основе органоминерального реактивного связующего для усиления исторических дорожных конструкций Соловецкого архипелага».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Морозова М.В. Влияние температурно-влажностной обработки на набор прочности мелкозернистого бетона с добавкой сапонитсодержащего материала // Нанотехнологии в строительстве. 2024. Т. 16, № 3. С. 227–234. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-3-227-234>. – EDN: DXLKDK.

ВВЕДЕНИЕ

Соловецкие острова являются наиболее популярным и востребованным историко-культурным комплексом Архангельской области [1, 2]. С целью сохранения и развития культурного и природного наследия архипелага Правительством Российской Федерации распоряжением № 163-р от 05.02.2016 г. был утвержден план мероприятий, который реализуется при поддержке Минстроя России и включает модернизацию инженерной, жилищно-коммунальной и социальной инфраструктуры острова.

Важной составляющей для выполнения данного плана является развитие и восстановление дорожной сети архипелага, связанное с реконструкцией и восстановлением имеющихся объектов, строительством новых постоянных и временных транспортных магистралей [3]. Так, например, для восстановления и развития дорожной сети Соловецких островов могут быть использованы бетонные плиты. Эти сборные, устраиваемые из отдельных изделий дорожные покрытия изготавливаются на заводах с соблюдением технологических правил и режимов ухода за бетоном, обеспечивающих их необходимое качество. Преимуществом дорожных железобетонных плит является возможность движения транспорта сразу после устройства покрытия [4, 5].

В настоящее время для улучшения эксплуатационных характеристик бетонных изделий активно внедряются составы с добавками отходов производств [6–8], в том числе микро- и наноуровня [9–14].

Важная экономическая составляющая такого подхода связана с использованием местной (локально распространенной) сырьевой базы. Так, для Архангельской области в качестве такого материала может применяться сапонитсодержащий отход горнодобывающей промышленности. Эффективность его использования в композициях с цементом была доказана рядом исследований. Так, в [15, 16] установлено, что при получении мелкозернистого бетона добавка высокодисперсного сапонитсодержащего материала (ССМ) снижает расход вяжущего за счет химической трансформации соединений, входящих в состав минералов горной породы [17, 18], и повышает эксплуатационные характеристики, такие как прочность, морозостойкость и водонепроницаемость. Поэтому возможность применения мелкозернистых бетонов с добавкой ССМ для производства дорожных плит приобретает особое значение как с экономической (снижение расхода цемента), так и с экологической (утилизация отходов производств) точек зрения.

Одним из способов ускорения процесса набора прочности композитов является пропаривание.

Это позволяет значительно сократить сроки изготовления бетонных изделий, не снижая их качество, и увеличить объем продукции. Однако исследования, связанные с влиянием температурно-влажностной обработки на процесс твердения композита с добавкой сапонитсодержащего материала, ранее не были изучены. Вместе с тем установлено [19], что сорбция влаги высокодисперсным ССМ, управляющей структурообразованием при твердении бетона, позволяет улучшить эксплуатационные характеристики композита. Кроме того, при проектировании состава изделия количественное содержание воды затворения рассчитывается исходя из величины водопоглощения сапонитсодержащего материала, при котором достигалась оптимизация содержания водной фазы в системе. Однако в условиях повышенной влажности данное соотношение может значительно измениться и оказать влияние на процесс набора прочности композита.

Поэтому целью данной работы является изучение влияния температурно-влажностной обработки на набор прочности мелкозернистого бетона с добавкой сапонитсодержащего материала.

В исследованиях [20] показано, что в нормальных условиях твердения образование трехкальциевого силиката (C_3S) приводит к формированию слабосталлических гидратов силиката кальция ($C-S-H$) с последующим образованием портландита [21, 22]. Повышение температуры окружающей среды приводит к тому, что связи в $C-S-H$ становятся неустойчивыми [23], а при $70^\circ C$ — образуются кристаллы C_2SH , ускоренное формирование которых приводит к снижению механических свойств композита. Данное негативное действие можно компенсировать за счет уменьшения Ca/Si отношения, что достигается путем увеличения микродисперсной составляющей в бетонной смеси.

Кроме кристаллов гидросиликатов кальция, которые являются основными носителями прочности, в бетоне также формируются волокнистые тоберморитоподобные соединения. В настоящее время существует множество работ, посвященных искусственному синтезированию кристаллов тоберморита [20, 24]. Поэтому влияние высоких температур на процессы его образования достаточно хорошо изучено. Установлено, что формирование кристаллов происходит при $160 - 180^\circ C$, а нагревание до $300^\circ C$ превращает тоберморит в риверсидит. В случае продолжительной обработки насыщенным паром (в первые сутки твердения бетона) тоберморит при температуре $150^\circ C$ замещается ксонотлитом [25]. Следовательно, ускоренный метод твердения бетона должен оказывать только положительный эффект на формирование прочной и плотной структуры. Однако в случае использования в качестве добавки

высокодисперсного сапонитсодержащего материала может наблюдаться и обратный эффект (снижение прочности), связанный с сорбционными свойствами и особенностями его структуры.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Материалы

Для проведения исследований опытные пробы сапонитсодержащей суспензии отбирались из хвостохранилища на глубине 1 метр. Затем выделяли ССМ из оборотной воды методом электролитной коагуляции, основанной на переводе высокодисперсных частиц твердой фазы в состояние, близкое к изoeлектрическому.

Для изготовления образцов мелкозернистого бетона в качестве вяжущего был использован портландцемент ЦЕМ II/A-Ш 32,5Н производителя «Евроцемент». Заполнитель — песок средней крупности месторождения «Кеницы», Архангельская область. Вода затворения — водопроводная, соответствующая ГОСТ 23732-2011.

Методы

Выделенный из оборотной воды сапонитсодержащий материал высушивали в сушильном шкафу фирмы «BINDER» до постоянной массы при температуре $105^\circ C$. Для получения высокодисперсной твердой фазы использовали метод механического диспергирования и планетарную шаровую мельницу «Retsch PM100». Измельчение материала осуществлялось в течение 90 мин при скорости вращения ротора 420 об/мин с использованием мелющих тел в количестве 20 шт., выполненных из карбидвольфрама (шары диаметром 20 мм).

Размер частиц определяли на анализаторе размера субмикронных частиц и дзета-потенциала Delsa Nano Series Zeta Potential and Submicron Particle Size Analyzers («DelsaNano») методом измерения динамического и электрофоретического светорассеяния. Полученный высокодисперсный образец охарактеризовали методом сорбции азота на анализаторе «Autosorb-iQ-MP» по величине удельной поверхности $S_{уд}$ (теория БЭТ).

Модуль крупности и истинную плотность песка определяли по ГОСТ 8735-88, а истинную плотность сапонитсодержащего материала — по ГОСТ 21216-2014. Химический состав ССМ определяли на рентгенофлуоресцентном анализаторе «МетЭксперт».

Изготовление образцов мелкозернистого бетона контрольного и опытного (с добавкой ССМ) составов осуществляли по стандартным методикам. Набор прочности образцов определяли двумя способами:

в нормальных условиях (использовали камеру-шкаф «КНТ-60» для хранения образцов бетона и цемента с автоматическим поддержанием температуры и влажности) и ускоренным методом с помощью пропаривания (камера пропарочная универсальная «КУП-1» по ГОСТ 9758-86 и ГОСТ 25485-89).

Испытания на прочность образцов-кубов размером $70 \times 70 \times 70$ мм проводили на автоматическом испытательном прессе «ТП-1000» (прочность на сжатие по ГОСТ 10180). Предел прочности при сжатии определяли как среднее арифметическое по трем параллельным измерениям.

Для исследования микроструктуры образцов мелкозернистого бетона методом растровой электронной микроскопии использовали электронный микроскоп «Zeiss Sigma VP» (ЦКП «Арктика» при САФУ имени М.В. Ломоносова).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выделенный, высушенный и измельченный сапонитсодержащий материал (в виде порошка) обладал средним размером частиц 445 ± 40 нм и удельной поверхностью 50670 ± 10 м²/кг.

Истинные плотности песка (модуль крупности $M_k = 2,21$) и ССМ составили 2640 кг/м³ и 2630 кг/м³, соответственно.

Определенный элементный состав (табл. 1) сапонитсодержащего материала, и в пересчете на оксиды, показал, что основными составляющими анализируемой пробы являются оксиды кремния, магния и железа.

Из представленных данных следует, что сапонитсодержащий материал не содержит вредных для здоровья человека элементов, концентрация которых превышает предельно-допустимые значения.

В продолжение исследований были изготовлены контрольные (МЗБ) и опытные (с добавкой ССМ) образцы мелкозернистого бетона (МЗБ_{ССМ}), составы которых представлены в табл. 2. Количество высокодисперсной добавки, которое вводили в бетонную смесь, рассчитывали на основании ранее полученных результатов кинетических исследований процесса водопоглощения сапонитсодержащего материала [19]. Равномерность смешения высокодисперсной минеральной добавки с исходными сырьевыми компонентами достигали последовательным перемешиванием вяжущего и заполнителя с добавкой ССМ.

Как уже отмечалось выше, набор прочности образцов осуществляли двумя способами: в нормальных условиях (1-МЗБ; 1-МЗБ_{ССМ}) и ускоренным путем пропаривания (2-МЗБ; 2-МЗБ_{ССМ}) при температуре 80°C в течение шести часов. Определение прочностных характеристик 1-МЗБ и 1-МЗБ_{ССМ} проводили на 28 суток (проектный возраст). Образцы 2-МЗБ и 2-МЗБ_{ССМ} спустя сутки после затворения водой извлекали из металлических форм и помещали в пропарочную камеру. По истечении времени выдержки образцы постепенно охлаждали, обтирали сухой тряпкой с целью удаления лишней влаги и определяли их прочностные характеристики.

Динамика набора прочности мелкозернистого бетона опытного и контрольного составов приведена на рис. 1.

Таким образом, ускоренный способ набора прочности мелкозернистого бетона путем пропаривания положительно действует только на контрольные образцы. Для композита с добавкой ССМ температурно-влажностная обработка оказывает противоположное действие.

Полученные результаты (рис. 1) показали, что динамика набора прочности образцов, твердеющих

Таблица 1

Элементный состав ССМ и в пересчете на оксиды

Элемент	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Sr
Содержание, %	22,00	4,82	46,89	2,21	5,45	1,19	0,23	0,35	16,30	0,39	0,17
Оксид	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	CrO	MnO ₂	Fe ₂ O ₃	NiO	SrO
Содержание, %	19,80	4,94	54,43	1,44	4,14	1,08	0,36	0,77	12,65	0,27	0,11

Таблица 2

Состав образцов мелкозернистого бетона

Образец	Состав на получение 1 м ³ бетонной смеси, кг				Плотность, кг/м ³
	цемент	песок	вода	ССМ	
Контрольный, МЗБ	557	1380	283	—	2107
Опытный, МЗБ _{ССМ}	557	1358	390	22	2292

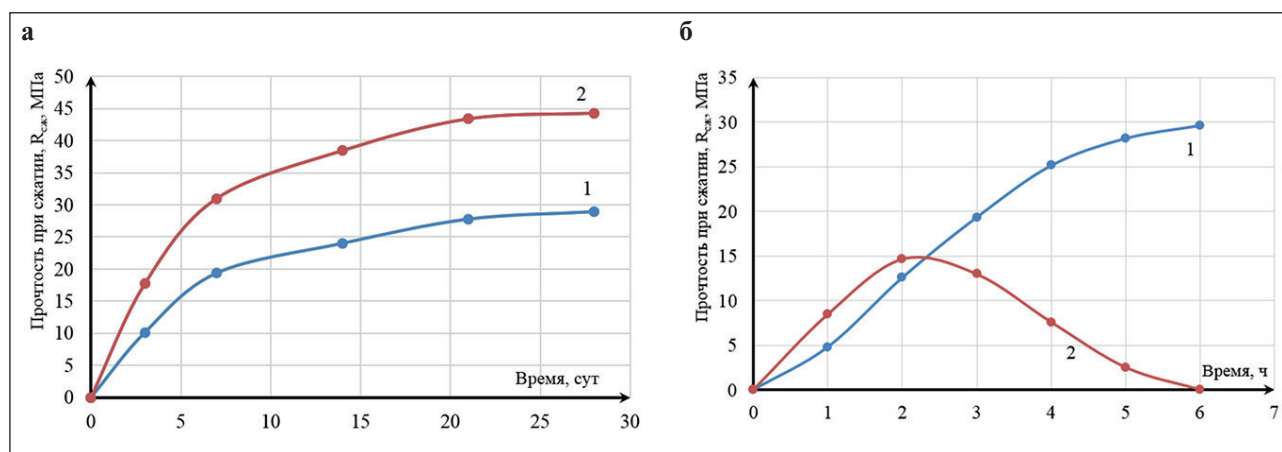


Рис. 1. Динамика набора прочности образцов мелкозернистого бетона при твердении: а) в нормальных условиях; б) ускоренным способом (пропаривание); 1 – контрольный состав; 2 – опытный состав

в нормальных условиях, имеет однотипный характер как для опытного, так и для контрольного составов. В начальный момент времени (7 сут.) наблюдается активный участок набора прочности. Однако уже на 7 сутки прочность при сжатии у образцов опытного состава на 40% выше, чем у контрольного. Проектная прочность (на 28 суток) для 1-МЗБ составила 28,94 МПа (класс В20), а для 1-МЗБ_{ссм} – 44,28 МПа (класс В30). Стоит отметить, что введение высокодисперсной сапонитсодержащей добавки способствует повышению класса прочности бетона и ведет к сокращению цементной составляющей.

При ускоренном способе твердения динамика набора прочности 2-МЗБ_{ссм} имеет отличный характер. Так, в первые два часа (стадия изотермического прогрева) наблюдается активный участок повышения прочности у обоих образцов. Причем для опытного этот участок характеризуется большей интенсивностью. Последующее твердение 2-МЗБ имеет линейную зависимость с постепенным повышением прочности до проектной за шесть часов. Для 2-МЗБ_{ссм} спустя два часа пропаривания прочность резко начинает снижаться, а спустя шесть

часов наступает видимое разрушение структуры бетона (рис. 2).

Исследования показали, что стадия изотермического нагрева положительно влияет на набор прочности образцов 2-МЗБ_{ссм} только в начальный период (в течение двух часов). Продолжительное пропаривание этого бетона приводит к снижению прочностных характеристик опытных образцов, что, вероятнее всего, связано с перенасыщением влагой структуры композита.

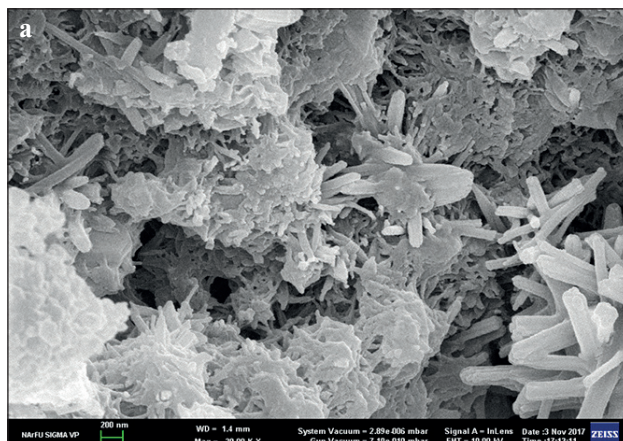
С целью объяснения резкого снижения прочности бетона с высокодисперсной сапонитсодержащей добавкой были сделаны фотографии микроструктуры образцов после трехчасового выдерживания в пропарочной камере «КУП-1» (рис. 3).

Растровая электронная микроскопия (РЭМ) композитов, набравших проектную прочность через 28 суток, показала, что структура опытного и контрольного образцов представлена в виде конгломератов частиц и новообразований гидросиликатов, размер которых колеблется от 2 до 20 мкм. В обоих материалах присутствуют губчатые, с развитой микропористой поверхностью и игольчатые части-



Рис. 2. Внешний вид образцов после пропаривания состава: а) контрольного; б) опытного

Контрольный состав



Опытный состав

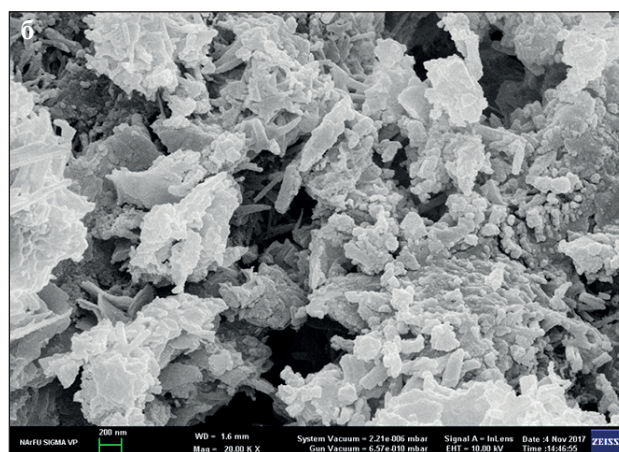
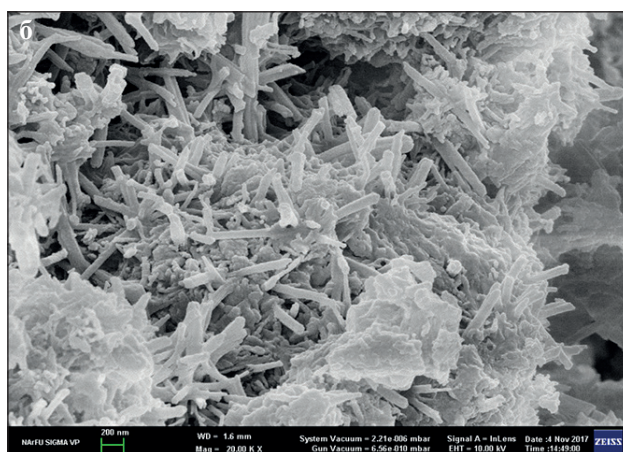
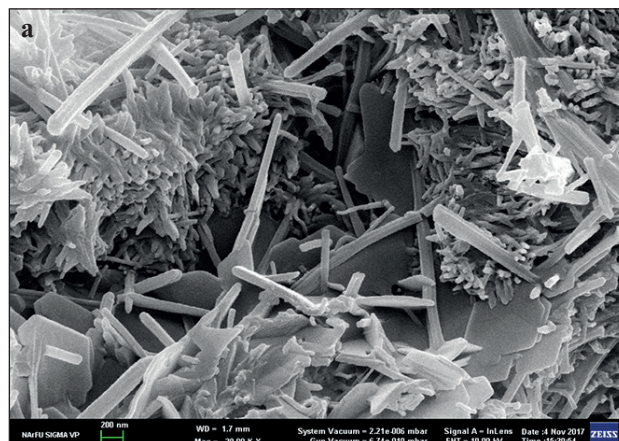


Рис. 3. Микроструктура образцов мелкозернистого бетона при твердении:
а) в нормальных условиях; б) ускоренным способом (пропаривание)

цы. Причем количество и длина последних в структуре опытного образца возрастает почти в 2 раза по сравнению с контрольным. Дополнительное образование кристаллов игольчатой формы свидетельствует о присутствии субмикрорекристаллов гидросиликатов группы тоберморита, которые образуются в присутствии высокодисперсной сапонитсодержащей добавки и играют роль дополнительного связующего.

После температурно-влажностной обработки мелкозернистого бетона с высокодисперсной добавкой его микроструктура была представлена, в основном, губчатыми частицами, а количество образовавшихся игольчатых значительно уменьшилось по сравнению с контрольным. Наблюдается также значительное образование в опытном образце пустот, которые можно отнести к дефектам структуры полученного бетона.

Известно, что сапонит имеет трехслойную кристаллическую структуру, причем расстояние между ее пакетами может легко изменяться, так как связь

между ними обуславливают только силы Ван-дер-Ваальса. Данный факт может приводить к значительному набуханию высокодисперсных глинистых порошков под действием влаги (воды).

Такое набухание частиц тонкодисперсной минеральной добавки создает избыточное давление в микроструктуре твердеющего композита. Этот процесс вызывает разрушение внутренней структуры мелкозернистого бетона с ССМ и приводит к снижению его прочностных характеристик при пропаривании.

В продолжении исследований для подтверждения выше высказанной гипотезы был выполнен следующий эксперимент: навеску сапонитсодержащего материала массой 2 г помещали в стеклянный мерный цилиндр объемом 50 см³ и добавляли в него 20 мл воды. Полученную реакционную смесь интенсивно перемешивали путем встряхивания и отстаивали в течение 30, 90, 180 мин (табл. 3).

Полученные данные (табл. 3) показали, что все пробы высокодисперсного сапонитсодержащего ма-

Таблица 3

Изменение величины набухания сапонитсодержащего материала от времени

Время выдержки, мин	Объем навески ССМ, см ³		Изменение объема ССМ, см ³
	сухого	водонасыщенного	
30	2,2	7,9	5,7
90	2,4	9,6	7,2
180	2,0	11,0	9,0

териала активно поглощали воду. Так, через 30 минут материал увеличился в объеме в 3,6 раза, а спустя три часа – в 5,5 раза, по сравнению с первоначальным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Важный практический вывод, который можно сделать на основании представленных экспериментальных результатов, являет следующее положение: в случае использования высокодисперсной добавки

сапонитсодержащего материала для получения мелкозернистого бетона нельзя менять условия твердения образцов с нормальных на ускоренный способ путем их пропаривания. В последнем случае уже после выдержки опытных проб при температурно-влажностном воздействии в течение двух-трех часов происходит потеря их прочностных качеств. Данный факт связан с процессами насыщения частиц сапонита водой и последующим их значительным набуханием.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мазилова Е.А. Развитие арктического туризма на примере Соловецкого архипелага // В сборнике: Русский Север и Арктика: фундаментальные проблемы истории и современности. Сборник научных статей. Составитель О.В. Зарецкая. Архангельск. 2019. 55-61
2. Грушенко Э.Б. Развитие индустрии туризма на Соловецких островах // Наука-2020. 2016. № 5 (11)
3. Цветков А.Ю. Стратегия рекреационно-инфраструктурного развития Соловецких островов // Экономика и предпринимательство. 2018. № 2 (91). 282-286
4. Зиневич С.И., Каюмов А.К. Плиты для сборных дорожных покрытий с наименьшим «клавишным» эффектом // Наука и техника. 2022. Т. 21. № 3. 196-200
5. Трофимов В.И., Егоров А.Р., Хитрич Г.А. Сборные дорожные плиты для арктических зон // Научный вестник Арктики. 2022. № 12. 51-56
6. Шарифов А., Акрамов А.А., Умаров У.Х., Хокиев М.К., Ахмедов М.Ф. Эффекты микронаполняющих минеральных добавок в бетоне // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. 2020. № 1 (49). 150-154
7. Poorna P.S., Mohamed I.A., Lakshmi P.S., Gayathri G., Beulah M., Sudhir M.R. A comprehensive investigation of the effect of mineral additives to bituminous concrete. *Materials Today: Proceedings*. 2021; 46(1): 714-721. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.090>
8. Zhen H., Lingling H., Yang L., Jun H., Yixin S. Use of sandstone powder as a mineral additive for concrete. *Construction and Building Materials*. 2018; 186: 276-286. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.228>
9. Xianfeng W., Shaocong C., Zhenhong Y., Jun R., Xiaogang Z., Feng X. Self-healing concrete incorporating mineral additives and encapsulated lightweight aggregates: Preparation and application. *Construction and Building Materials*, 2021; 301: 124119. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124119>
10. Королев Е.В., Гришина А.Н., Иноземцев А.С., Айзенштадт А.М. Исследование кинетики структурообразования цементных дисперсных систем. Часть I // Нанотехнологии в строительстве. 2022. Т. 14. № 3. 176–189. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-3-176-189>
11. Королев Е.В., Гришина А.Н., Иноземцев А.С., Айзенштадт А. М. Исследование кинетики структурообразования цементных дисперсных систем. Часть II // Нанотехнологии в строительстве. 2022. Т. 14. № 4. 263–273. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-263-273>

12. Коровкин М.О., Короткова А.А., Ерошкина Н.А. Эффективность комплексной минеральной добавки в мелкозернистом самоуплотняющемся бетоне // Региональная архитектура и строительство. 2021. № 3 (48). 114–122
13. Пичугин А.П., Чесноков Р.А., Тамарова В.С., Пивкина А.Д. Укрепление дорожных грунтовых оснований минеральными вяжущими с дисперсными добавками // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. 2021. № 1. 178–183.
14. Gaowen Z., Zhen Z., Guanzhou R., Tao W., Peng J., Shijun D., Mei S., Henghui F. Utilization of recycled concrete powder in modification of the dispersive soil: A potential way to improve the engineering properties. *Construction and Building Materials*. 2023; 389: 131626. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131626>
15. Морозова М.В., Айзенштадт А.М., Махова Т.А. Применение сапонит-содержащего материала для получения морозостойких бетонов // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 1. 28–31.
16. Lesovik V., Ayzenshtadt A., Frolova M., Lesovik R., Strokov V. «Green» Composites for North-Arctic Region Development // The Open Ecology Journal. 2014; 7: 32–36.
17. Глезер А.М. Аморфные и нанокристаллические структуры: сходство, различия, взаимные переходы // Российский химический журнал. 2002. Т.46. № 5. 57–63
18. Пшембаев М.К., Ковалев Я.Н., Яглов В.Н. Особенности процессов гидратации и твердения цемента в присутствии наночастиц // Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева. 2020. № 1. 175–184
19. Морозова М.В. Сорбция водной фазы минеральной сапонит-содержащей добавкой в мелкозернистые бетоны // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2018. № 4. 20–25
20. Mingxu C., Lingchao L., Shoude W., Piqi Z., Wenlong Z., Shuxin Z. Investigation on the formation of tobermorite in calcium silicate board and its influence factors under autoclaved curing. *Construction and Building Materials*. 2017; 280–288.
21. Oh J.E., Clark S.M., Wenk H.R. Experimental determination of bulk modulus of 14 Å tobermorite using high pressure synchrotron X-ray diffraction. *Cement and Concrete Research*. 2012; 42(2): 397–403.
22. Tikkanen J., Cwirzen A., Penttala V. Effects of mineral powders on hydration process and hydration products in normal strength concrete. *Construction and Building Materials*. 2014; 72: 7–14.
23. Meducin F., Zanni H., Noik C. Tricalcium silicate (C_3S) hydration under high pressure at ambient and high temperature. *Cement and Concrete Research*. 2008; 38(3): 320–324.
24. Кафтаева М.В., Рахимбаев И.Ш. К вопросу о фазовом составе гидросиликатного связующего автоклавного газобетона // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2013. № 10 (3). 370–372
25. Галицков К.С., Баранова М.Н., Болховецкий А.С. Исследование влияния структурно-фазового состава ячеистого бетона на внутреннее тепловыделение в процессе его автоклавной обработки // Градостроительство и архитектура. 2023. Т. 13. № 51. 73–78

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Морозова Марина Владимировна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры композиционных материалов и строительной экологии, Северный (Арктический) Федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия, m.morozova@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8497-9786>

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 18.05.2024; одобрена после рецензирования 05.06.2024; принята к публикации 10.06.2024.