

Строительные материалы и изделия

УДК 691.32

DOI 10.23968/1999-5571-2025-22-2-77-86

© Р. Апсаликова, студентка

© R. Apsalikova, student

© А. Д. Когай, ассистент

© A. D. Kogai, assistant lecturer

© Т. С. Хлебцова, студентка

© T. S. Hlebtsova, student

© М. А. Дмитриева, д-р физ.-мат. наук, профессор

© M. A. Dmitrieva, Dr. Sci. Phys.-Math., Professor

© В. Н. Лейцин, д-р физ.-мат. наук, профессор

© V. N. Leitsin, Dr. Sci. Phys.-Math., Professor

(Балтийский федеральный университет

(Immanuel Kant Baltic Federal University,

им. Иммануила Канта, Калининград, Россия)

Kaliningrad, Russia)

E-mail: ad.kogai@yandex.ru

E-mail: ad.kogai@yandex.ru

СВЯЗЬ СТРУКТУРЫ И МОРОЗОСТОЙКОСТИ МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА

RELATIONSHIP BETWEEN STRUCTURE AND FROST RESISTANCE OF MODIFIED FINE-GRAINED CONCRETE

Представлено комплексное исследование характеристик прочности и морозостойкости мелкозернистых бетонов, модифицированных воздухововлекающими добавками, с привлечением развитого алгоритма экспериментального метода компьютерной томографии. Определены значения прочности образцов в возрасте 28 суток и после 200 циклов замораживания-оттаивания. Методом компьютерной томографии рассчитана пористость в сечении модифицированных образцов. Установлена связь пористости и прочности, экспериментально доказано, что повышенные значения пористости положительно влияют на долговечность структуры в условиях попеременного замораживания-оттаивания, тогда как при нормальных условиях эксплуатации пористость негативно влияет на прочностные характеристики. Полученные результаты позволяют выявить связь структурных характеристик, представленных пористостью, и прочностных характеристик модифицированных мелкозернистых бетонов, а также подтвердить перспективность применения компьютерной томографии в исследовании свойств строительных материалов неразрушающим методом.

Ключевые слова: мелкозернистый бетон, добавки, структура, компьютерная томография, пористость, морозостойкость, прочность.

The paper presents a comprehensive study of the strength and frost resistance characteristics of fine-grained concrete modified with air-entraining additives using a developed algorithm for the experimental method of computed tomography. The strength values of samples at the age of 28 days and after 200 freeze-thaw cycles were determined. The porosity in the cross-section of modified samples has been calculated using the computed tomography method. The relationship between porosity and strength has been established, and it is experimentally proven that increased porosity values have a positive effect on the durability of the structure under alternate freeze-thaw conditions, while under normal operating conditions, porosity has a negative effect on strength characteristics. The results obtained allow identifying the relationship between the structural characteristics represented by porosity and the strength characteristics of modified fine-grained concrete, as well as confirming the prospects for using computed tomography in studying the properties of building materials by a non-destructive method.

Keywords: fine-grained concrete, additives, structure, computed tomography, porosity, frost resistance, strength.

Введение

Большая часть территории Российской Федерации имеет климатические условия

с выраженной сезонностью, в связи с чем строительное материаловедение сталкивается с необходимостью использования

модифицирующих добавок, придающих конструктивным элементам повышенные показатели сопротивляемости циклам замораживания–оттаивания. В бетонных работах такими добавками являются воздухововлекающие добавки, способные повышать морозостойкость материала введением в структуру мельчайших пор воздуха. При этом могут изменяться эксплуатационные характеристики всего материала, такие как водопоглощение и прочность, нередко понижая основные показатели эффективности бетона.

Модификация бетонов различными добавками природного и техногенного происхождения ведет к изменению свойств морозостойкости и водонепроницаемости. В [1] исследована модификация бетона добавками природного происхождения, такими как цеолит, глинистые вещества с высоким содержанием каолина и каменная мука. Определено, что путем комбинации представленных добавок можно повысить прочность до 24,5 %, а морозостойкость до 73,5 % по отношению к исходному немодифицированному бетону. Взаимодействие микрокремнезема, гиперпластификатора и полипропиленовой фибры в определенном соотношении позволяет повысить морозостойкость мелкозернистого бетона в 1,5 раза, а водонепроницаемость — в 2,2 раза [2]. Модификация мелкозернистых бетонов сажевыми отходами теплоэлектростанций в сочетании с базальтовым фиброволокном и суперпластификатором способствует улучшению физико-механических свойств бетона и увеличению эксплуатационных характеристик морских подводных сооружений за счет повышения параметров водонепроницаемости и морозостойкости [3]. Тонкодисперсный микрокремнезем в сочетании с комплексной добавкой на основе нанодисперсного диоксида кремния и пеностеклом в качестве заполнителя используется для создания теплоизоляционно-конструкционного бетона, пригод-

ного для использования в регионах с суровыми климатическими условиями [4].

В зарубежной практике также используется модификация бетонов минеральными компонентами для увеличения показателей морозостойкости и водонепроницаемости. Введение нанокремнезема и суперпластификатора способствует большему количеству выдержанных циклов замораживания–оттаивания образцов модифицированного бетона [5, 6], причем в присутствии базальтового фиброволокна эффективность нанокремнезема относительно морозостойкости бетона увеличивается [7]. Исследуется морозостойкость и порообразование в структуре модифицированного бетона с содержанием цеолита [8], при этом отмечается лучшая сопротивляемость циклам замораживания–оттаивания на поздних стадиях твердения бетона, пористая структура по мере затвердевания улучшается.

Основным фактором деструктивного влияния циклов попеременного замораживания–оттаивания на прочность бетона является давление воды, кристаллизующейся в его поровом пространстве. На сложный процесс разрушения влияет еще ряд факторов, к которым можно отнести величину пористости и характер пор (замкнутые или сообщающиеся) [9, 10]. Замкнутая пористость способна положительно влиять на морозостойкость бетона благодаря эффекту сокращения длины капилляров и, как следствие, уменьшению капиллярного подсоса [11]. В случае, если искусственная замкнутая пористость создается модификаторами, возможны и такие сопутствующие эффекты, как сорбция жидкости бетоном и гидрофобизация стенок пор [12]. Учитывая сложный характер разрушения бетона, исследователи [13] пришли к выводу о комплексной природе деструкции с учетом давления льда при замерзании воды в порах, гидродинамического воздействия при миграции воды, гидростатического давления

от воды в тупиковых порах, напряжения от температурных деформаций на макроуровне в зонах контакта цемента с заполнителем и на микроуровне между кристаллогидратами, усталостных дефектов и др. В итоге большинство факторов прямым либо косвенным образом связаны с особенностями поровой структуры.

Одним из наиболее эффективных инструментов анализа внутренней структуры бетона является компьютерная рентгеновская томография. Данный метод неразрушающего контроля позволяет на основании послойных изображений образца и анализа интенсивности поглощения его структурными элементами рентгеновского излучения получать данные о распределении плотности дискретных включений [14].

Метод неразрушающей компьютерной рентгеновской томографии имеет ряд преимуществ в сравнении с традиционными подходами к исследованию структуры. Например, при исследовании распределения пор в пенобетоне используется метод последовательного среза слоев с дальнейшей обработкой их цифровых изображений [15], однако механический срез вызывает искажение структуры, образец разрушается, а сам метод требует длительного времени, затрачиваемого на испытание. Деформация также происходит при подготовке тонких срезов образцов ячеистых бетонов с использованием оптической микроскопии [16]. Такие методы, как плотиметрия и порометрия, позволяют получить данные о суммарном объеме пор в образце, однако они требуют его насыщения различными жидкими фазами [17]. К неразрушающим методам анализа внутренней структуры бетона можно отнести ядерный магнитный резонанс (ЯМР), в основе которого лежит взаимодействие молекул с ядерными спинами с магнитным полем и радиочастотным излучением. Данный метод отличается высокой эффективностью, но его использование ограничено

в связи с необходимостью высокоспециализированного оборудования [18].

Таким образом, компьютерная рентгеновская томография выступает в качестве метода неразрушающего анализа структуры бетона, не требующего дополнительной подготовки или механического разрушения исследуемого образца, с возможностью ускоренного получения достоверной информации о распределении структурных элементов в объеме материала. Сохранение образца позволяет производить мониторинг структуры бетона на различных этапах набора прочности и повреждаемости в процессе циклического замораживания-оттаивания.

Целью данной работы является изучение внутренней структуры образцов модифицированного бетона методом компьютерной томографии в сравнении с традиционными методами разрушающего контроля прочности для оценки связи структурных характеристик бетона с прочностью и морозостойкостью.

Материалы и методы

С целью изучения структурных характеристик мелкозернистого бетона было сформировано семь составов с добавлением различных концентраций модифицирующих добавок в соответствии с рекомендациями производителей.

В качестве вяжущего использовался портландцемент «Евроцем 500 супер» (Россия, «Евроцемент»), строительный песок в качестве мелкого заполнителя и модификаторы ASCO-93 (Корея, ЗАО «Русхимсеть») и VIBROPOR HS (Польша, «Stachema») для оптимизации структуры.

Воздухововлекающая добавка ASCO-93 является сильным порообразователем, смачивателем и пластификатором; ее химическую основу составляет альфа-олефин сульфонат натрия (АОС), являющийся анионным ПАВ. VIBROPOR HS представляет собой суперпластификатор на основе лигносульфонатов, к достоинствам которого мож-

но отнести улучшение физико-механических свойств (прочности, морозостойкости и водонепроницаемости).

В процессе воздухововлечения происходит образование воздушных пор, равномерно распределяющихся в теле бетона. При использовании воздухововлекающих добавок объем воздуха в бетонной матрице увеличивается до 8 % [19], тем самым увеличивая объем материала. За счет этого претерпевает изменения ряд реологических параметров смеси, таких как подвижность и вязкость. Плотность является наиболее чувствительным параметром к концентрации воздухововлекающей добавки и может понижаться при введении более 5 %, но, если не превышать данного уровня, возможно добиться роста плотности за счет пластифицирующего действия добавки. Введение воздухововлекающих добавок не вызывает изменения состава продуктов гидратации, а следовательно, не приводит к изменению сроков схватывания. Наиболее важным вопросом является исследование влияния воздухововлекающих добавок на физико-механические свойства, такие как морозостойкость и прочность [19]. Воздушные поры, формирующиеся при введении воздухововлекающих добавок, выступают в качестве компенсирующих зон, т. е. являются резервными объемами, принимающими расширяющийся в структуре лед, тем самым снижая избыточное разрушающее давление [19].

Введение суперпластификатора способствует сокращению водопотребления и изменению технологических и реологических характеристик бетонной смеси. При схватывании смеси оказываемый эффект значительно зависит от состава пластификатора, влияющего на свойства образующихся гидратных фаз [20]. Например, суперпластификаторы на основе лигносульфонатов замедляют начальный процесс образования гидросиликатов кальция и стабилизируют алюмоферритную фазу. На уровне макро-

структуры при снижении водоцементного отношения в растворе создаются стесненные условия формирования структуры цементного камня, состоящего из измененных гидросиликатных фаз [21]. Таким образом, эффект введения пластификаторов заключается не только в сокращении водопотребления смеси и увеличения плотности, но и в физико-химическом воздействии на фазовый состав и структуру цементных композиций.

Используемые модификаторы в концентрациях, взятых по массе сухой смеси, добавлялись в воду, которой далее затворялась сухая смесь. Состав № 1 — базовый (Ц : П : В = 1 : 2,5 : 0,5); составы № 2 и 3 — с добавлением 0,05 % модификатора ASCO-93 (в обычном и вспененном виде соответственно); № 4 — с добавлением 0,01 % ASCO-93 (в вспененном виде); № 5 — с добавлением 0,1 % модификатора VIBROPOR; № 6 — с добавлением 0,4 % VIBROPOR; № 7 — с добавлением 0,6 % VIBROPOR.

Бетонной смесью каждого состава наполняли стальные трехсекционные формы для изготовления образцов-балочек размером 40×40×160 мм. Спустя сутки после выдержки при нормальных условиях образцы распалубливали и перемещали в ванну для выдержки бетонных образцов до набора проектной прочности. В возрасте 28 суток образцы взвешивали и насыщали водой в соответствии с методикой, указанной в ГОСТ Р 58277–2018. Контрольные образцы взвешивали и испытывали на прочность. Исследуемые водонасыщенные образцы повторно взвешивали, оборачивали в пленку и перемещали в камеру замораживания/размораживания образцов строительных материалов. По прошествии 100, 150 и 200 циклов определяли массу и прочность образцов.

Для анализа внутренней структуры образцов с использованием компьютерной рентгеновской томографии использовали рентгенопрозрачные ампулы сохранения с бетонной смесью различного состава [22].

Цилиндрический образец помещали в камеру томографа для получения серии изолированных снимков поперечных сечений. После компьютерной обработки информация преобразовывалась в объемную модель. Обработка в программе VG-Studio позволяет отсечь лишний спектр серого с целью получить информацию о структуре образца (рис. 1). Дальнейшая обработка 2D-сечений реализовывалась в программном комплексе ImageJ, позволяющем разделить градацию серого на участках от 0 (черный) до 255 (белый). Распределение можно зафиксировать в гистограмме, установив пороговые значения для выделения пор в структуре (рис. 2).

Результаты и обсуждение

Проведенные исследования позволили получить следующие результаты. Водопоглощение бетона по массе рассчитывалось как отношение массы воды в образце после водонасыщения к массе сухого изделия. Результаты приведены на рис. 3.

Увеличение водопоглощения бетонов составов № 2–7 относительно контрольного свидетельствует о модификации порового пространства и росте открытой пористости.

Результаты прочности при испытании на сжатие сравнивались для образцов, не подверженных попеременному замораживанию–оттаиванию, и после выдержки

200 циклов. Полученные результаты приведены на рис. 4.

Можно отметить снижение прочностных характеристик при введении исследуемых добавок с наиболее характерным уменьшением прочности у состава № 3. Из модифицированных составов наибольшей базовой прочностью обладает состав № 5, а после испытаний на морозостойкость — состав № 4. В таблице представлены значения разницы базовой прочности, измеренной в возрасте 28 суток, и прочности по истечении 200 циклов замораживания–оттаивания для каждого состава. Состав № 2 отличается наименьшим приростом прочности по истечении 200 циклов попеременного замораживания–оттаивания, а состав № 4 — наибольшим.

Значения разницы в прочности больше контрольной ($\Delta R_1 = 6,4$ МПа) у составов № 4, 6, 7 свидетельствуют о положительном влиянии воздухововлекающих добавок на морозостойкость, то есть при введении добавки модифицированная структура способна лучше сопротивляться микроразрушениям вследствие попеременного замораживания–оттаивания.

Снимки репрезентативных сечений образцов, полученные с использованием компьютерной рентгеновской томографии, представлены на рис. 5.

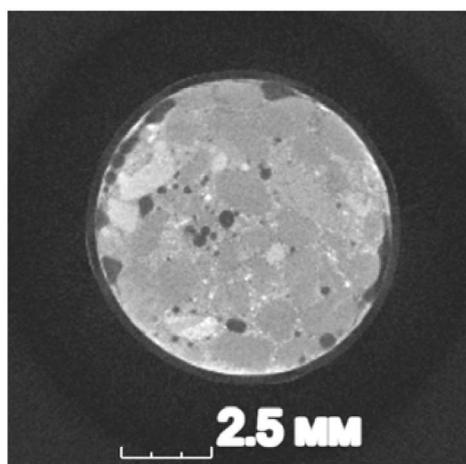


Рис. 1. 2D-модель

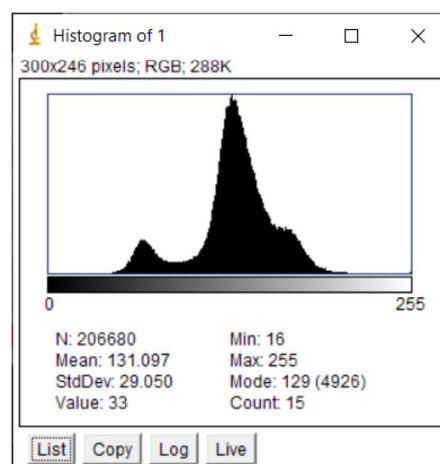


Рис. 2. Гистограмма

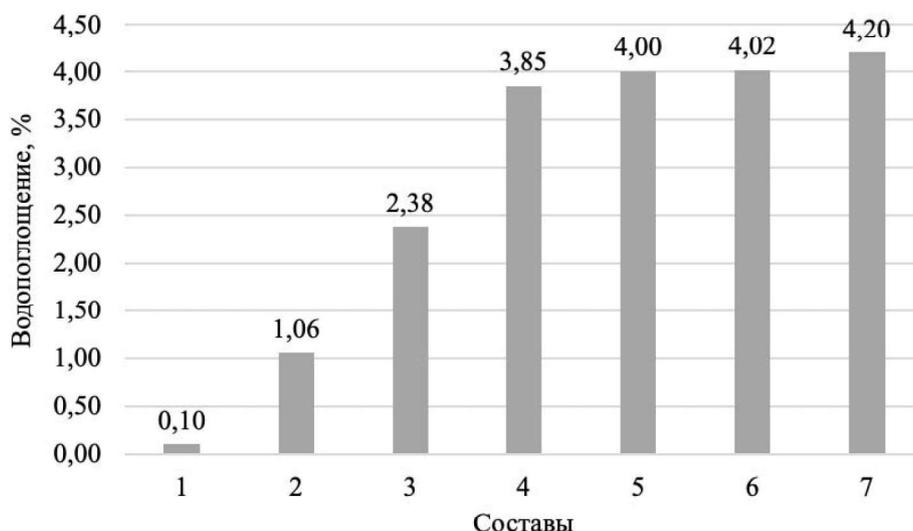


Рис. 3. Водопоглощение по массе

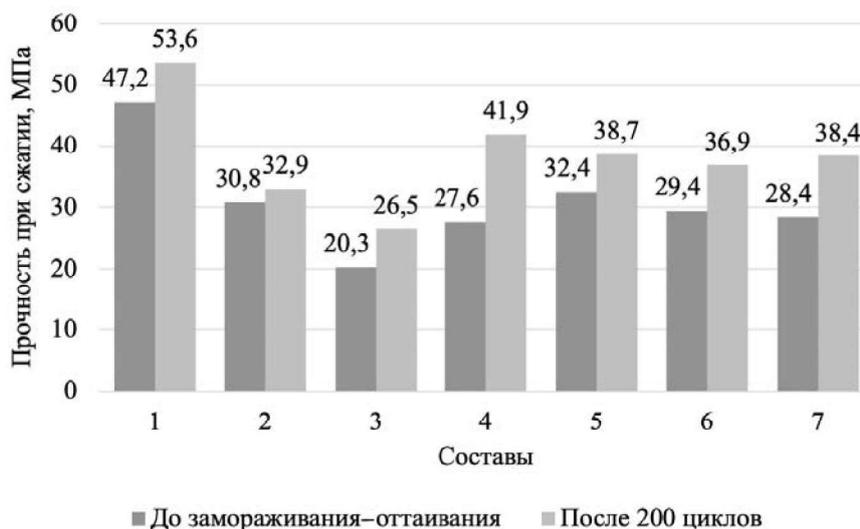


Рис. 4. Прочность при сжатии

Дальнейшая работа с полученными снимками заключается в анализе структуры в сечении с помощью программного комплекса ImageJ, позволяющего разделить изображения на оттенки серого в диапазоне от 0 (черный) до 255 (белый). Определяется порог цветов для пикселей, соответствующих порам. Для визуализации

распределения пор в сечении выбранный диапазон оттенков серого окрашивается в красный (рис. 6), и производится расчет пористости.

В соответствии с полученными результатами был произведен расчет доли площади пор, занимаемой ими в сечении образца. Результаты приведены на рис. 7.

Изменение прочностных показателей ΔR

	Состав № 1	Состав № 2	Состав № 3	Состав № 4	Состав № 5	Состав № 6	Состав № 7
ΔR , МПа	6,4	2,1	6,2	14,3	6,3	7,5	10,0

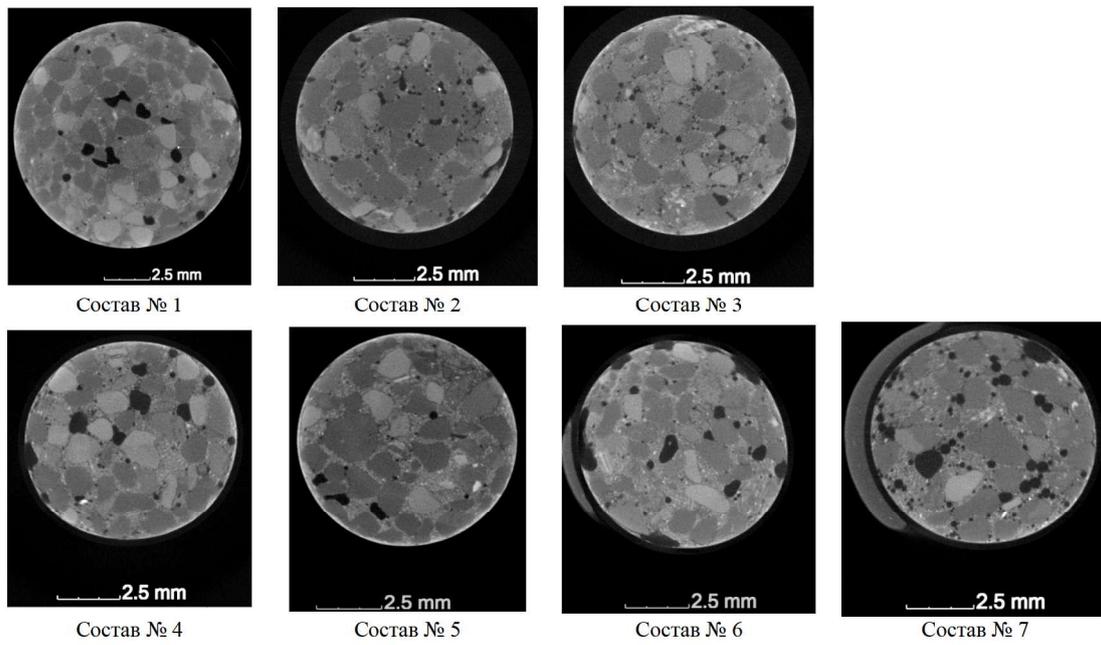


Рис. 5. Снимки сечений образцов составов № 1–7

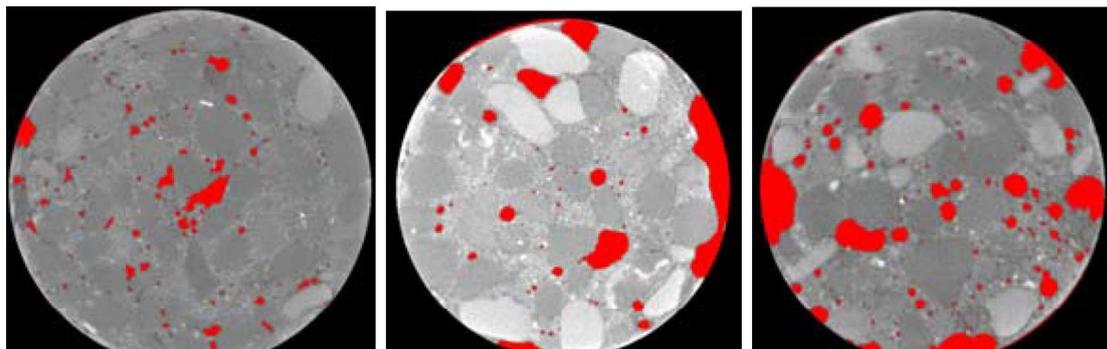


Рис. 6. Обработка полученных изображений образцов: а — состав № 3; б — состав № 6; в — состав № 7

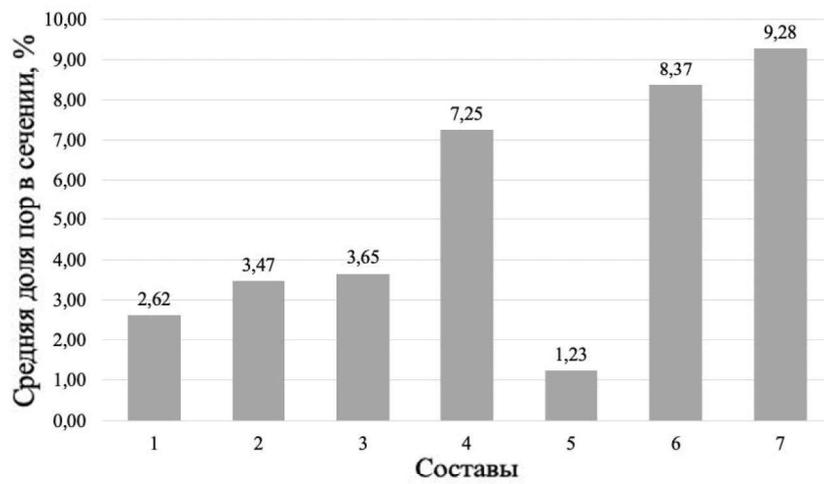


Рис. 7. Пористость в сечении

Результаты демонстрируют увеличение пористости у модифицированных образцов относительно контрольного. Наименьшим количеством пор в репрезентативном сечении обладает состав № 5, наибольшим — состав № 7.

В соответствии с прочностными испытаниями у состава № 5 зафиксирована наибольшая базовая прочность среди модифицированных составов. У этого же состава по результатам томографии и подсчета пористости в сечении отмечена наименьшая доля пор. У составов № 4, 6, 7 наблюдаются наибольшие показатели пористости в сечении, для этих же составов наблюдается наибольший прирост в прочности образцов после 200 циклов замораживания-оттаивания. Можно заключить, что повышенные значения пористости положительно влияют на долговечность структуры в условиях попеременного замораживания-оттаивания, тогда как при нормальных условиях эксплуатации пористость негативно влияет на прочностные характеристики.

Заключение

Результатом работы стало определение связи структурных характеристик, представленных пористостью, и эксплуатационных характеристик, представленных прочностью при попеременных циклах замораживания-оттаивания, у модифицированного мелкозернистого бетона. Определены показатели водопоглощения по массе модифицированных составов, показано, что при использовании воздухововлекающих добавок происходит рост открытой пористости. Измерены показатели прочности контрольного и модифицированных составов в возрасте 28 суток и после 200 циклов замораживания-оттаивания. С помощью рентгеновской компьютерной томографии получены значения доли пористости в сечениях образцов, определена связь пористости и прочностных характеристик. Установлено, что повышенные значения пористости положительно влияют

на долговечность структуры в условиях попеременного замораживания-оттаивания, тогда как при нормальных условиях эксплуатации пористость негативно влияет на прочностные характеристики. Полученные результаты позволяют выявить связь структурных характеристик, представленных пористостью, и прочностных характеристик модифицированных мелкозернистых бетонов, а также подтвердить перспективность применения компьютерной томографии в исследовании свойств строительных материалов неразрушающим методом.

Библиографический список

1. Буренина О. Н., Саввинова М. Е., Андреева А. В. Исследование физико-механических свойств модифицированного мелкозернистого бетона из местного сырья Республики Саха (Якутия) // Вестник ВСГУТУ. 2018. № 1 (68). С. 25–29.
2. Соболев Г. М., Зотов А. Н. Прочность мелкозернистых бетонов с химически и термообработанной полипропиленовой фиброй // Вестник научных конференций. 2019. № 12–1 (52). С. 107–109.
3. Перфилов В. А., Габова В. В., Лукьяница С. В. Бетон для строительства подводных нефтегазовых сооружений // Инженерный вестник Дона. 2020. № 11 (71). С. 313–320.
4. Степанова И. В., Абу-Хасан М. С., Соловьева В. Я. Инновационный конструкционно-теплоизоляционный бетон для изоляции и повышения устойчивости мерзлых грунтов основания // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2022. Т. 19, № 2. С. 378–389.
5. Tarangini D., Sravana P., Srinivasa Rao P. Effect of nano silica on frost resistance of pervious concrete // Materials Today: Proceedings. 2022. Vol. 51 (8). Pp. 2185–2189.
6. Lu J., Pei W., Zhang M., Wan X., Zhang J., Wang Y. Coupled effect of the freeze-thaw cycles and salt erosion on the performance of concretes modified with nanoparticles // Cold Regions Science and Technology. 2024. Vol. 217. 104046.
7. Wang Y., Xie M., Zhang J. Mechanical properties and damage model of modified recycled concrete under freeze-thaw cycles // Journal of Building Engineering. 2023. Vol. 78. 107680.
8. Zheng X., Zhang J., Ding X., Chu H., Zhang J. Frost resistance of internal curing concrete with calcined natural zeolite particles // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 288 (10). 123062.

9. Стольников В. В. Исследования по гидротехническому бетону. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1962. 330 с.

10. Горчаков Г. И., Капкин М. М., Скрамтаев Б. Г. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений. М.: Стройиздат, 1965. 195 с.

11. Powers T. C. A Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistance of Concrete // Journal of the American Concrete Institute. Proceedings. 1945. Vol. 41 (1). Pp. 245–272.

12. Powers T. C., Helmuth R. A. Theory of Volume Changes in Hardened Portland-Cement Paste During Freezing // Highway Research Board Proceedings. Washington, D. C. January 13–16, 1953. Vol. 32. Pp. 285–297.

13. Батяновский Э. И., Гуриненко Н. С., Корсун А. М. Структура, непроницаемость и долговечность цементного бетона // Наука и техника. 2022. Т. 21, № 1. С. 19–27. DOI 10.21122/2227-1031-2022-21-1-19-27.

14. Дмитриева М. А., Козай А. Д., Лейцин В. Н., Товпинец А. О., Шиняева М. В. Экспериментально-теоретический подход оценки структуры мелкозернистых модифицированных бетонов // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18, № 1. С. 70–81. DOI 10.22227/1997-0935.2023.1.70–81.

15. Осипов С. П., Прищепина И. А., Кудяков А. И., Батрагин А. В., Осипов О. С. Компьютерная томография пенобетона // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 2 (38). С. 146–152. DOI 10.18324/2077-5415-2018-2-146–152.

16. Вылегжанин В. П., Пинскер В. А., Петрова Т. М. Микропористость ячеистого бетона и ее влияние на теплопроводность // Строительные материалы. 2021. № 8. С. 67–71.

17. Рябчевский И. С., Богачева М. А., Сулейманов К. А. Анализ методов определения пористой структуры ячеистых бетонов // VIII Междунар. студенческий строительный форум — 2023: сб. докл. В 2 т. Белгород, 28 ноября 2023 г. Белгород: Белгородский гос. технол. ун-т им. В. Г. Шухова, 2023. Т. 2. С. 225–230.

18. Cherepetskaya E. B., Zalevskii I. A. O. Study of porosity of sedimentary rock samples by nuclear magnetic resonance and laser-ultrasound diagnostics // Mining Informational and Analytical Bulletin. 2023. № 8. Pp. 63–71.

19. Демидов Р. В. Введение воздухововлекающих добавок как способ улучшения свойств бетонной смеси и бетона // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительные технологии: сб. ст. / под ред. М. И. Бальзанникова, К. С. Галицкова, А. К. Стрелкова. Самара: Самарский гос. архит.-строит. ун-т, 2015. С. 118–120.

20. Тараканов О. В. Влияние суперпластификаторов на формирование начальной структуры цементных материалов // Технологии бетонов. 2010. № 11–12 (52–53). С. 52–55.

21. Крамар Л. Я., Трофимов Б. Я., Черных Т. Н., Орлов А. А., Шуляков К. В. Современные суперпластификаторы для бетонов, особенности их применения и эффективность // Строительные материалы. 2016. № 11. С. 21–25.

22. Пат. на полезную модель 228366 U1, Российская Федерация, МПК G01N 23/046. Несъемная опалубка для изготовления образцов мелкозернистых цементных композиционных материалов для рентгеновской компьютерной томографии / М. А. Дмитриева, В. Н. Лейцин, А. В. Пузатова, А. О. Товпинец. № 2024104119: заявл. 16.02.2024; опубл. 26.08.2024.

References

1. Burenina O. N., Savvinova M. E., Andreeva A. V. *Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh svoystv modifitsirovannogo melkozernistogo betona iz mestnogo syr'ya Respubliki Sakha (Yakutiya)* [Study of physical and mechanical properties of modified fine-grained concrete from local raw materials of the Republic of Sakha (Yakutia)]. *Vestnik VSGUTU – Bulletin of VSGUTU*, 2018, no. 1 (68), pp. 25–29.

2. Sobolev G. M., Zotov A. N. *Prochnost' melkozernistykh betonov s khimicheski i termoobrabotannoy polipropilenovoy fibroy* [Strength of fine-grained concrete with chemically and thermally treated polypropylene fiber]. *Vestnik nauchnykh konferentsiy – Bulletin of Scientific Conferences*, 2019, no. 12–1 (52), pp. 107–109.

3. Perfilov V. A., Gabova V. V., Luk'yanitsa S. V. *Beton dlya stroitel'stva podvodnykh neftegazovykh sooruzheniy* [Concrete for construction of underwater oil and gas structures]. *Inzhenerniy vestnik Dona – Engineering Bulletin of the Don*, 2020, no. 11 (71), pp. 313–320.

4. Stepanova I. V., Abu-Khasan M. S., Solov'eva V. Ya. *Innovatsionnyy konstruktsionno-teploizolyatsionniy beton dlya izolyatsii i povysheniya ustoychivosti merzlykh gruntov osnovaniya* [Innovative structural and heat-insulating concrete for isolation and increase of stability of frozen base soils]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya – Bulletin of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University*, 2022, vol. 19, no. 2, pp. 378–389.

5. Tarangini D., Sravana P., Srinivasa Rao P. Effect of nano silica on frost resistance of pervious concrete. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 51 (8), pp. 2185–2189.

6. Lu J., Pei W., Zhang M., Wan X., Zhang J., Wang Y. Coupled effect of the freeze-thaw cycles and salt erosion

on the performance of concretes modified with nano particles. *Cold Regions Science and Technology*, 2024, vol. 217, 104046.

7. Wang Y., Xie M., Zhang J. Mechanical properties and damage model of modified recycled concrete under freeze-thaw cycles. *Journal of Building Engineering*, 2023, vol. 78, 107680.

8. Zheng X., Zhang J., Ding X., Chu H., Zhang J. Frost resistance of internal curing concrete with calcined natural zeolite particles. *Construction and Building Materials*, 2021, vol. 288 (10), 123062.

9. Stol'nikov V. V. *Issledovaniya po gidrotekhnicheskomu betonu* [Investigations on hydrotechnical concrete]. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1962, 330 p.

10. Gorchakov G. I., Kapkin M. M., Skramtaev B. G. *Povyshenie morozostoykosti betona v konstruktivnykh promyshlennykh i gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Increase of frost resistance of concrete in the structures of industrial and hydraulic engineering facilities]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1965, 195 p.

11. Powers T. C. A Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistance of Concrete. *Journal of the American Concrete Institute. Proceedings*, 1945, vol. 41 (1), pp. 245–272.

12. Powers T. C., Helmuth R. A. Theory of Volume Changes in Hardened Portland-Cement Paste During Freezing. *Highway Research Board Proceedings*, Washington, D. C. January 13–16, 1953, vol. 32, pp. 285–297.

13. Batyanovskiy E. I., Gurinenko N. S., Korsun A. M. *Struktura, nepronitsaemost' i dolgovechnost' tsementnogo betona* [Structure, impermeability and permeability of concrete]. *Nauka i tekhnika – Science and Technology*, 2022, vol. 21, no. 1, pp. 19–27. DOI 10.21122/2227-1031-2022-21-1-19-27.

14. Dmitrieva M. A., Kogay A. D., Leytsin V. N., Tovpinets A. O., Shinyaeva M. V. *Ekspirental'no-teoreticheskiy podkhod otsenki struktury melkozernistykh modifitsirovannykh betonov* [Experimental-theoretical approach of structure estimation of fine-grained modified concretes]. *Vestnik MGSU – Bulletin of MSCU*, 2023, vol. 18, no. 1, pp. 70–81. DOI 10.22227/1997-0935.2023.1.70–81.

15. Osipov S. P., Prishchepa I. A., Kudyako A. I., Batranin A. V., Osipov O. S. *Komp'yuternaya tomografiya penobetona* [Computer tomography of foam concrete]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii – Systems. Methods. Technologies*, 2018, no. 2 (38), pp. 146–152. DOI 10.18324/2077-5415-2018-2-146–152.

16. Vylegzhanin V. P., Pinsker V. A., Petrova T. M. *Mikroporistost' yacheistogo betona i ee vliyanie na*

teploprovodnost' [Microporosity of cellular concrete and its influence on thermal conductivity]. *Stroitel'nye materialy – Building Materials*, 2021, no. 8, pp. 67–71.

17. Ryabchevskiy I. S., Bogacheva M. A., Suleymanov K. A. *Analiz metodov opredeleniya poristoy struktury yacheistykh betonov* [Analysis of methods for determination of porous structure of cellular concrete]. *Trudy VIII Mezhdunar. studencheskogo stroitel'nogo foruma – 2023. Sb. dokl.* [Proceedings of the VIII Int. student construction forum – 2023. Collection of sci. articles]. V 2 vols. Belgorod, 28 noyabrya 2023 g. Belgorod, Belgorodskiy gos. tekhnol. un-t im. V. G. Shukhova Publ., 2023, vol. 2, pp. 225–230.

18. Cherepetskaya E. B., Zalevskii Ia. O. Study of porosity of sedimentary rock samples by nuclear magnetic resonance and laser-ultrasound diagnostics. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2023, no. 8, pp. 63–71.

19. Demidov R. V. *Vvedenie vozdukhovovlekayushchikh dobavok kak sposob uluchsheniya svoystv betonnoy smesi i betona* [Introduction of air-involving additives as a way to improve the properties of concrete mixture and concrete]. *Traditsii i innovatsii v stroitel'stve i arkhitekture. Stroitel'nye tekhnologii. Sb. st.* [Traditions and innovations in building and architecture. Construction technologies. Collection of sci. articles]. Ed. by Bal'zannikov M. I., Galitskov K. S., Strelkov A. K. Samara, Samarskiy gos. arkhit.-stroit. un-t Publ., 2015, pp. 118–120.

20. Tarakanov O. V. *Vliyanie superplastifikatorov na formirovanie nachal'noy struktury tsementnykh materialov* [Influence of superplasticizers on the formation of the initial structure of cement materials]. *Tekhnologii betonov – Concrete Technologies*, 2010, no. 11–12 (52–53), pp. 52–55.

21. Kramar L. Ya., Trofimov B. Ya., Chernykh T. N., Orlov A. A., Shuldyakov K. V. *Sovremennyye superplastifikatory dlya betonov, osobennosti ikh primeneniya i effektivnost'* [Modern superplasticizers for concrete, features of their application and efficiency]. *Stroitel'nye materialy – Building Materials*, 2016, no. 11, pp. 21–25.

22. Dmitrieva M. A., Leytsin V. N., Puzatova A. V., Tovpinets A. O. *Nes'emnaya opalubka dlya izgotovleniya obraztsov melkozernistykh tsementnykh kompozitsionnykh materialov dlya rentgenovskoy komp'yuternoy tomografii* [Non-removable formwork for making samples of fine-grained cement composite materials for X-ray computed tomography]. Patent RF na poleznuyu model' [Russian Federation patent for utility model], 228366 U1, no. 2024104119, 2024.