

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2024, Том 11, № 2 / 2024, Vol. 11, Iss. 2 <https://t-s.today/issue-2-2024.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/08SATS224.pdf>

DOI: 10.15862/08SATS224 (<https://doi.org/10.15862/08SATS224>)

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки)

Работа выполнена в рамках выполнения гранта Министерства науки и высшего образования № 075-15-2024-559, АРКТИКА

Мелкозернистый самоуплотняющийся бетон с компенсированной усадкой для строительства транспортных сооружений

Пискунов А.А., Харченко И.Я., Харченко А.И.,
Пестрякова Е.А., Мазур Е.В., Карпухина А.А., Галабурда И.А.

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Карпухина Александра Александровна, e-mail: aleks.karpukhina@mail.ru

Аннотация. Значительные объемы транспортного строительства реализуются в условиях отсутствия развитой базы стройиндустрии, где доставка и использование высокопрочного щебня для ответственных конструкций, являются сложной проблемой из-за слаборазвитой транспортной инфраструктуры, что особенно характерно для районов Сибири и Крайнего Севера нашей страны. В связи с этим, использование местных сырьевых ресурсов, в том числе некондиционных кварцевых песков, является актуальной задачей при возведении монолитных бетонных и железобетонных конструкций.

Наиболее эффективными областями применения самоуплотняющегося мелкозернистого бетона (СУ МЗБ) может быть выполнение работ в особо сложных условиях, когда использование крупного заполнителя и применение вибрационного уплотнения затруднено или не представляется возможным, например в случаях бетонирования арматурных каркасов монолитных конструкций, имеющих небольшое расстояние между арматурой или густоармированных монолитных конструкций специального назначения. Главными отличительными свойствами самоуплотняющегося бетона являются сохраняемая длительное время высокая подвижность при отсутствии расслаивания, что производится посредством введения в состав

бетона тонкодисперсных наполнителей с применением высокоэффективных пластификаторов, обеспечивающих сохранение высокой подвижности бетонных смесей в течение заданного времени при относительно низких значениях водовяжущего отношения.

Однако, применение мелкозернистых бетонов с использованием некондиционных кварцевых песков имеет недостатки, к которым можно отнести повышенный расход цемента, повышенную пористость, низкую трещиностойкость и повышенную деформативность, что требует компенсации повышенным расходом арматуры. Использование СУ МЗБ с применением самоуплотняющихся смесей и компенсированной усадкой при строительстве транспортных сооружений может быть решением в условиях ограниченной доступности высокопрочных, качественных заполнителей, что позволяет снизить затраты и сроки производства работ, обеспечить требуемую прочность и долговечность бетона, а также эксплуатационную надежность конструкций.

Ключевые слова: транспортное строительство; самоуплотняющийся бетон; композиционные вяжущие; трещиностойкость и долговечность; ликвидация водопроявлений; физико-химические исследования; геотехническое строительство

Fine-grained self-compacting concrete with compensated shrinkage for transportation facilities construction

Alexander A. Piskunov, Igor Ya. Kharchenko, Alexey I. Kharchenko,
Ekaterina A. Pestryakova, Evgeny V. Mazur, Alexandra A. Karpuhina, Igor A. Galaburda

Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

Corresponding author: Alexandra A. Karpuhina, e-mail: aleks.karpukhina@mail.ru

Abstract. Considerable volumes of transport construction are realised in the absence of a construction industry developed base, where delivery and use of high-strength crushed stone for critical structures is a difficult problem in areas with underdeveloped transport infrastructure. This problem is especially relevant for the regions of Siberia and the Far North of our country. In this connection, the use of local raw materials is an important and urgent problem for the construction of solid concrete and reinforced concrete structures is an important and urgent problem. The use of self-compacting fine-grained concrete, considered in this paper, has a wide range of applications. The most effective areas of self-compacting fine-grained concrete application can be the performance of works in especially difficult conditions, when the use of coarse aggregate and the use of vibratory compaction is difficult or impossible. Also, in cases of concrete casting reinforcement frames with small reinforcement spacing in special purpose solid structures, fine-grained

concrete with self-compacting concrete offers a number of advantages. However, the use of fine-grained concrete using off-quality silica sands has disadvantages, which include increased cement consumption, increased porosity, low crack resistance and increased deformability, which requires compensation by increased reinforcement consumption. The use of fine-grained concrete with the use of self-compacting mixtures and compensated shrinkage in the transport structures construction can be a solution in limited availability conditions of high-strength, high-quality aggregates, which allows to reduce costs and terms of works, to provide the required strength and durability of concrete, as well as operational reliability of structures.

Keywords: transport construction; self-compacting concrete; composite binders; crack resistance and durability; water seepage elimination; physical and chemical studies; geotechnical construction

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Введение

Introduction

Значительные объемы транспортного строительства реализуются в условиях отсутствия развитой базы стройиндустрии. В этой связи строительство из монолитного железобетона, ориентированного на использование местной сырьевой базы, является существенным резервом снижения затрат и сроков производства работ при строительстве транспортных сооружений различного назначения.

С учётом существенного дефицита качественных крупных заполнителей для бетона в большинстве регионов России, значительную актуальность представляет проблемы строительства из монолитного железобетона с применением мелкозернистых бетонов (МЗБ) с использованием некондиционных кварцевых песков при обязательном обеспечении комплекса повышенных требований к технологичности смесей, прочности и долговечности бетона, эксплуатационной надёжности конструкций.

Однако имеется ряд факторов, сдерживающих применение мелкозернистых бетонов, к которым относятся: повышенный расход цемента, повышенная пористость, низкая трещиностойкость, повышенная деформативность, которая компенсируется повышенным расходом арматуры [1–3].

Наиболее эффективными областями применения МЗБ могут быть выполнение работ в особо сложных условиях, когда использование крупного заполнителя и применение вибрационного уплотнения затруднено или не представляется возможным [4–6]. К таким условиям можно отнести, например, устройство ограждений котлованов по методу «стена в грунте», строительство мостовых и тоннельных сооружений, а также различных густоармированных монолитных конструкций специального назначения. В этих условиях целесообразно применение литьевой технологии укладки бетона на с использование самоуплотняющихся (СУ) бетонных смесей.

Главными отличительными свойствами самоуплотняющегося бетона являются сохраняемая длительное время высокая подвижность при отсутствии расслаивания [4].

Эти свойства обеспечиваются посредством введения в состав бетона тонкодисперсных наполнителей с применением высокоэффективных пластификаторов, обеспечивает сохранение высокой подвижности бетонных смесей в течение заданного времени даже при относительно низких значениях водовяжущего отношения [5; 6].

1. О влиянии усадочных деформаций на формирование структуры и свойства самоуплотняющегося мелкозернистого бетона

1. On the influence of shrinkage deformations on the structure formation and properties of self-compacting fine-grained concrete

Одной из важных проблем, связанных с обеспечением долговечности СУ-МЗБ, является проблема минимизации или полного устранения вредного влияния развития усадочных деформаций, сопровождающих твердение минеральных вяжущих, на структуру и свойства бетонов. Следствием развития усадочных деформаций является образование трещин, являющихся источником коррозии бетона и арматуры, причиной низкой морозостойкости, снижения конструктивных и эксплуатационных характеристик бетона и строительных конструкций на его основе.

При твердении цемента усадочные деформации развиваются под влиянием как внутренних, так и внешних факторов. Под внешними физическими факторами, вызывающим развитие усадки, подразумевается потеря свободной и адсорбционной воды, размещённой в капиллярно-пористой структуре цементного камня при соответствующих температурно-влажностных условиях твердения и эксплуатации. Внутренние факторы влияния на величину усадки проявляются вследствие развития процесса гидратации при связывании воды затворения минералами цементного клинкера и другими гидравлически активными компонентами цемента.

Величина усадки бетона в значительной степени определяется не только температурно-влажностными условиями твердения, но и свойствами цемента, величиной водовяжущего отношения, а также количеством и гранулометрическим составом крупного и мелкого заполнителей. При этом, инертные заполнители и наполнители в составе бетона выполняют функцию каркаса, ограничивающего развитие усадки цементного камня.

Существенное влияние на развитие усадочных деформаций оказывает прочность цементного камня и бетона, обеспеченная в результате ухода после укладки бетонной смеси в опалубку. На основании анализа многочисленных исследований установлено, что при твердении в воздушно-сухих условиях влияние влагопотерь на развитие усадочных бетонов в возрасте 7 сут и 28 сут после твердения в нормальных условиях, снижается соответственно не менее, чем в 2 и 4 раза по сравнению с усадкой бетона после 1 сут твердения в нормальных условиях. Это обусловлено тем, что степень гидратации цемента, а соответственно и

прочность цементного камня возрастает, а количество свободной воды в его структуре снижается. При развитии процесса гидратации возрастает не только прочность, но и соответственно уменьшается количество крупных пор и капилляров в структуре цементного камня, уменьшается количество свободной воды в его структуре и соответственно снижается величина усадки. Длительность ухода за твердеющим бетоном, с целью снижения усадки, обусловлена необходимостью достижения равновесной влажности между окружающей средой и влажностью в структуре цементного камня.

Формирование трещин по поверхности бетона является не только и не столько следствием общей величины влагопотерь, сколько величина градиента влажности по сечению бетонных и железобетонных конструкций.

Введение в состав бетонной смеси воды затворения сопровождается развитием процессов гидратации цемента, проявляющееся в изменении вязкости и последующем затвердевании вследствие образующихся продуктов гидратации цемента: гидросиликатов различной основности, гидросульфоалюминатов, гидросульфоалюмоферритов и гидроксида кальция. С развитием процесса гидратации увеличивается количество химически связанной воды, преобразующей минералы клинкера в цементный гель, связывающий заполнители, наполнители и негидратизированные зёрна цементного клинкера в структуру бетонной смеси. При дальнейшем развитии процесса гидратации гелеобразная структура упрочняется и уплотняется, преобразовываясь в состояние цементного камня, состоящего преимущественно из гидросиликатов кальция, с распределённой по их объёму капиллярно-пористой структурой, обеспечивая в значительной степени проектные параметры бетона. При полной гидратации цемента, ок. 25 % воды затворения химически связывается продуктами гидратации и ещё ок. 15 % адсорбируется на поверхности продуктов гидратации, и характеризуется как физико-химически и физически связанная вода, распределённая в порах и капиллярах цементного геля. Её подвижность ограничена физическими связями, исключающими свободное удаление и перемещение в нормальных температурно-влажностных условиях твердения, исключаяющем её участие в дальнейшем развитии процесса гидратации. Таким образом, наличие в составе бетона воды в количестве более 40 % от массы цемента, следует рассматривать как избыточное, формирующее открытую капиллярно-пористую структуру цементного камня и бетона. Дальнейшее увеличение водовязущего отношения сопровождается увеличением открытых пор и капилляров, что обуславливает повышенную величину усадки и снижение долговечности бетона. С другой стороны, применение смесей с В/Ц менее 0,4 является недостаточным для полной гидратации строительных цементов. При увеличении В/Ц с 0,4 до 0,6

общая пористость цементного камня увеличивается с 30 % до 45 %, что соответственно сопровождается увеличением усадки и трещинообразованием.

При твердении цемента следует различать кристаллизационную, гелевую и капиллярную воду. Кристаллизационная вода является химически связанным элементом в продуктах гидратации цемента и может быть удалена только при их дегидратационном разложении. Капиллярная вода является условно свободной и может удаляться при высушивании, с сохранением продуктов гидратации. Однако её удаление сопровождается развитием внутреннего напряжённого состояния в структуре цементного камня, а также частичным изменением состояния продуктов гидратации.

Поровая структура цементного камня имеет влажность, находящуюся в равновесном состоянии с влажностью окружающей среды. При этом, молекулы водяного пара адсорбируются на внутренней поверхности пор и капилляров, а также продуктах гидратации цемента. При определённой относительной влажности среды до 40 %, на внутренней поверхности пор и капилляров формируется мономолекулярный слой воды. При дальнейшем повышении влажности формируется многослойная водная плёнка, которая может замкнуть поры и капилляры с формированием мениска и соответствующим изменением внутреннего напряжённого состояния в объёме цементного камня. При понижении влажности среды процесс влагопотерь из структуры цементного камня развивается в обратном порядке. Анализ результатов исследования влияния влагопотерь на развитие усадочных деформаций позволил установить зависимость величины усадки от степени гидратации цемента. Установлено, с увеличением степени гидратации величина влагопотерь, и связанная с этим величина усадки, снижается. Это связано с прежде всего с тем, доля крупных пор и капилляров в объёме цементного камня, с увеличением степени гидратации, существенно уменьшается. Удаление воды из крупных пор и капилляров не оказывает существенного влияния на величину усадки. Кроме того, с увеличением возраста цементного камня, уменьшается количество несвязанной воды в его структуре. При этом интенсивность развития усадочных деформаций затухает по мере установления равновесной влажности в структуре цементного камня и окружающей средой. При относительной влажности выше 85 % наблюдается удаление влаги из крупных пор диаметром до 50 мкм. Наиболее интенсивно усадочные деформации развиваются при удалении воды из микропор диаметром 2 мкм — 50 нм. Удаление воды из мезопор диаметром 50 нм — 2 нм не оказывает существенного влияния на величину усадки, поскольку удаление этой воды, размещённой мономолекулярным слоем по внутренней поверхности пор и капилляров, не оказывает влияния на величину поверхностного натяжения и напряжённое состояние в структуре цементного камня.

Анализ развития усадки во времени показал, что длительность развития усадки определяется характером капиллярно-пористой структуры цементного камня, а также температурно-влажностными условиями твердения, включая интенсивность массообмена с окружающей средой. Установлено, что наиболее интенсивно усадочные деформации проявляются при относительной влажности среды менее 30 %, поскольку при этих условиях наблюдаются влагопотери из гелевых пор, что сопровождается развитием напряжения по поверхности пор и капилляров.

Повторное увлажнение цементного камня не позволяет в полном объёме обеспечить устранение проявившихся усадочных деформаций. Как показал анализ результатов исследования развития деформаций цементного камня при циклическом изменении относительной влажности от 100 % до 50 % и обратно до 100 %, остаточные усадочные деформации составляют не менее 30 % их максимальной величины. При этом не удалось установить корреляционной зависимости между расширением, при повторном увлажнении, и характером поровой структуры цементного камня. Это можно объяснить необратимыми изменениями в капиллярно-пористой структуре цементного камня при первичном высушивании. Кроме того, при первичных влагопотерях, гелевые поры частично закупориваются гидросиликатами кальция при удалении межслоевой воды, и оказываются недоступными для повторного адсорбционного увлажнения.

Как уже отмечалось, усадочные деформации цементного камня являются результатом развития 3-х процессов — физических, химических и физико-химических процессов, развитие которых совмещено во времени. Усадка, имеющая физическую природу, проявляется при удалении воды из капиллярно-пористой структуры цементного камня, на начальном этапе её формирования, которая находится ещё в пластичном или упруго-пластичном состоянии. Она является результатом влажностного градиента между обводнённой формирующейся структурой и влажностью окружающей среды, в результате чего формируется влажностный градиент по сечению твердеющего бетона. Следствием этого является развитие напряженного состояния в структуре твердеющего цемента под влиянием капиллярных сил в капиллярно пористой структуре. Кроме того, на поверхности свежееуложенного бетона, вследствие частичной седиментации, проявляется плёнка цементной суспензии. Испарение плёнки сопровождается уменьшением объёма твердеющего бетона и развитием дополнительных растягивающих напряжений в его структуре, что является причиной образования усадочных трещин по поверхности свежееуложенного бетона. Капиллярную усадку можно снизить путём оптимизации состава бетонной смеси и организацией надлежащего ухода за свежееуложенным бетоном до достижения им так

называемой критической прочности, величина которой должна быть не менее 3–5 МПа. Без организации ухода за свежесутоложенным бетоном величина капиллярной усадки может достигать величина 4–5 мм/м при ширине раскрытия усадочных трещин до 0,5–2,0 мм. При применении замедлителей твердения бетона капиллярная усадка может достигать 10 мм/м при ширине раскрытия трещин до 3,0 мм и более.

Одним из наиболее значительных компонентов в общем объеме усадочных деформаций является усадка вследствие развития процесса гидратации, которая имеет химическую природу. Причиной развития химической усадки является то, что продукты гидратации цемента занимают существенно меньший объем, чем суммарный объем воды затворения и минералов цементного клинкера. При развитии процесса гидратации в объеме твердеющего цементного камня развивается отрицательное давление, следствием чего развивается контракционная усадка. Химическая усадка является причиной развития внутренних напряжений в структуре цементного камня, что является причиной образования трещин в его структуре. Причём, величина химической усадки имеет существенное значение для высокопрочных бетонов с низким значением В/Ц, которая может достигать величины до 0,25–0,3 мм/м.

Дополнительное влияние на развитие усадочных деформаций оказывает перекристаллизация гидроксида кальция в карбонат кальция под влиянием углекислоты воздуха. Это вид усадочных деформаций имеет физико-химическую природу и обозначается как карбонизационная усадка. Причиной развития этого вида усадочных деформаций является уменьшение объема вследствие перекристаллизации гидроксида кальция в кальцит, что сопровождается испарением высвободившейся вода и уменьшением объема, занимаемого карбонатом кальция по сравнению с объемом, занимаемым в структуре цементного камня гидроксидом кальция. Объем этого вида усадки составляет ок. 50 % от объема влажностной усадки и развивается преимущественно при относительной влажности окружающей среды 50–70 % в периферийных зонах бетона.

При оценке влияния различных факторов на развитие представленных выше видов усадочных деформаций следует рассматривать внешние и внутренние факторы влияния. К внешним факторам, оказывающим влияние на величину и кинетику развития усадки следует отнести влажность окружающей среды, условия массообмена между бетоном и средой твердения, геометрические параметры бетонных и железобетонных конструкций. К внутренним факторам влияния следует отнести свойства и количество цемента в составе бетона, величину В/Ц, кинетика его затвердевания. При этом следует исходить из того, что фактором, главным образом определяющим величину усадки, является количество цемента в

составе бетона и величина В/Ц. При снижении В/Ц величина усадки также уменьшается в связи с тем, что в составе бетона распределяется меньшее количество свободной воды, при одновременном снижении степени гидратации цемента. Непрогидратированные зёрна цемента формируют каркасную структуру микробетона, по аналогии с каркасом в составе бетона, сформированным зёрнами мелкого и крупного заполнителя. При относительной влажности 65 % установлена практически линейная зависимость увеличения усадки с увеличением В/Ц в составе бетона. Важными факторами, оказывающими существенное влияние на развитие усадочных деформаций, является минеральный и зерновой состав цемента. При этом установлено, что повышенное содержание алита и белита в составе цемента предполагает повышенную величину усадки, а увеличение в составе клинкера содержания С3А наоборот, способствует снижению величины усадочных деформаций. Повышенная дисперсность цемента также является существенной предпосылкой для увеличения усадки бетона на его основе.

Одним из наиболее эффективных способов решений проблемы повышения долговечности бетонных и железобетонных конструкций является применение расширяющихся цементов. Для реализации всех потенциальных возможностей расширяющихся цементов необходимо обеспечить оптимальные условия для формирования структуры цементного камня. Для бетонов на основе расширяющихся цементов формирование полей собственных внутренних напряжений существенно сложнее, чем для бетонов на основе портландцемента. Это связано с тем, что при формировании структуры цементного камня на портландцементе в наружных зонах образца усадочные напряжения возникают только вследствие влагопотерь и карбонизации. Для бетонов на основе расширяющихся цементов, во внутренних зонах, вследствие продолжения процесса расширения, и в наружных зонах, вследствие влагопотерь и карбонизации, градиент собственных внутренних напряжений существенно увеличивается. Кроме того, в связи с формированием тонкопористой структуры цементного камня расширяющихся цементов, увеличивается влажностный градиент между внутренней и внешней зонами поперечного сечения. Это обеспечивает развитие значительных растягивающих напряжений в периферийных зонах, что сопровождается образованием сети трещин по поверхности цементного камня и бетона, часто имеющих чашеобразную форму. Результаты анализа структуры и свойств цементного камня в зоне его контакта с окружающей средой, при твердении в воздушно-сухих условиях в течение 3 сут показали, что верхний слой содержит наряду с другими продуктами гидратации значительное количество кальцита. Переходная зона между внешней и некарбонизированной внутренней зоной, состоит из моносульфата,

портландита, CSH-фазы и этtringита. Внутренняя зона затвердевших расширяющихся цементов содержит CSH-фазу, портландит и этtringит, а структура цементного камня является свободной от трещин, обладает достаточно высокой прочностью и плотностью. Таким образом, при практическом применении расширяющихся цементов и бетонов на их основе необходимо иметь в виду, что начальном этапе твердения, их структура является менее трещиностойкой, по сравнению с портландцементом, и требует обеспечение надёжной защиты от влагопотерь при уходе после бетонирования. В противном случае риск образования трещин по поверхности бетонных и железобетонных конструкций на основе расширяющихся цементов существенно выше, чем при применении обычных строительных цементов. Исключение влагопотерь и тщательный уход за твердением расширяющихся бетонов необходимо обеспечить как минимум в первые 48–72 час после завершения бетонирования, обеспечив достижение прочности ПЦ-матрицы достаточной для восприятия растягивающих напряжений, возникающих при развитии усадки. Многочисленные исследования процесса образования структуры расширяющихся цементов при относительной влажности около 100 % или при хранении в воде показали, что кинетика процесса расширения, степень гидратации ПЦ-матрицы, количество образованного этtringита и достижимая величина расширения в обоих случаях являются соизмеримыми.

Анализ продуктов гидратации показал, что при твердении в воде образуется тонкокристаллический волосообразный этtringит. При влажном хранении этtringит кристаллизуется в форме относительно коротких и толстых шестигранных игл. Такие существенные различия в морфологии образующегося этtringита, могут быть объяснены различной концентрацией ионов в поровом растворе и особенно различной величиной pH. При хранении в воде, под влиянием градиента концентрации, во внутренней структуре частично растворяется гидроксид кальция, что ведет к снижению концентрации Ca- и прежде всего OH-ионов в поровой структуре цементного камня, что сопровождается образованием тонкокристаллического этtringита. Этот этtringит, при нормальном хранении (20°C, 65 % относительная влажность), находится в не стабильном состоянии и быстро перекристаллизовывается в моносульфат, что ведет к падению прочности и повреждению цементной структуры. Этим объясняется тот факт, что твердение бетонов на расширяющихся цементах с большим потенциалом расширения в обводнённых условиях сопровождается образованием поверхностных трещин. С одной стороны, контактный слой расширяющегося цементного камня при хранении в воде разрыхлялся в связи с развитием капиллярного давления, что сопровождается развитием собственных напряжений в

поперечном сечении. С другой стороны, гидроксид кальция растворяется и вымывается из пор, благодаря чему образуется тонкокристаллический волосообразный этtringит, что ведет к ослаблению цементной структуры в зоне контакта с водой. Таким образом, при хранении в воде развивающийся процесс расширения сопровождается наложением растягивающего напряжения в связи с образованием этtringита с напряжением, вследствие капиллярного подсоса в контактной зоне, что ведет к формированию градиента напряжений в поперечном сечении и образованию трещин по поверхности. Следует отметить, что образование поверхностных трещин характерно в случаях применения расширяющихся цементов с экстремально высоким потенциалом расширения. Однако, представленный выше процесс особенностей формирования структуры цементного камня с расширяющимися добавками при хранении в воде имеет подобное развитие и для всех других расширяющихся цементов с небольшим потенциалом расширения. Это позволяет сделать следующие выводы для технологии бетонов на расширяющихся цементах: для реализации всех потенциальных возможностей расширяющихся цементов и обеспечения полного развития процесса расширения отсутствует необходимость их выдерживания в воде, как это было принято ранее в качестве оптимального ухода при твердении бетонов на расширяющихся цементах. Вполне достаточным является организация ухода, исключающего потерю воды затворения в период до 14 суток. Благодаря этому, при гидратации расширяющихся цементов формируется свободная от трещин структура цементного камня, независимо от величины потенциала расширения.

В строительной практике, при применении расширяющихся цементов, несвязанное увеличение объема проявляется только во внешнем слое бетонных и железобетонных конструкций, который является защитным слоем для арматуры. Расширение внутреннего объема бетонных и железобетонных конструкций ограничивается уложенной в их тело арматурой, а также опалубкой или соседними конструкциями. В поперечном сечении строительных элементов всегда присутствуют градиент растягивающих напряжений, который из-за влагопотерь и связанной с этим усадкой, увеличивается. Вследствие этого необходимо, главным образом при разработке строительно-технических мероприятий, применяемых для бетонов на расширяющихся цементах, обратить внимание на уменьшение разницы между расширением при свободном твердении и при ограниченном расширении. Эта цель достигается, например, при применении расширяющихся цементов с небольшим потенциалом расширения до 1 % и продолжительном (не менее 14 суток) твердении во влажных условиях.

При эксплуатации строительных конструкций на основе расширяющихся цементов на воздухе возникают не только физические изменения структуры бетона из-за возникновения градиента влажности, а также наблюдаются изменения продуктов гидратации под влиянием углекислого газа, находящегося в воздухе. При этом гидроксид кальция, под влиянием CO_2 преобразуется в карбонат кальция, что ведет к развитию, так называемой, карбонизационной усадки ПЦ-составляющей расширяющихся цементов. Карбонизационную усадку следует учитывать в общем объеме усадки бетона, несмотря на то что её доля не превышает 20 %. Однако, для расширяющихся цементов, которые в качестве важного элемента их структуры содержат этtringит, воздействие диоксида углерода имеет многостороннее влияние. Наряду с образованием карбоната кальция, в связи с перекристаллизацией гидроксида кальция понижается показатель pH в поровом растворе, что, при достижении критической величины, сопровождается перекристаллизацией этtringита в форму моносulfата. С другой стороны, известно, что под влиянием CO_2 образуется, так называемый кальцитсодержащий этtringит, что сопровождается нарушением структуры цементного камня и бетона на его основе. Исходя из вышеизложенного нами были выполнены исследования стабильности синтетического этtringита и свойств расширяющегося цементного камня при воздушном хранении (20°C , 65 % относительная влажность) с повышенной концентрацией CO_2 . На основании анализа результатов выполненных исследований установлено, что этtringит, который изготавливался при показателе pH более 12,5, после выдерживания в воздушной среде с повышенной концентрацией углекислого газа в течение 2-х лет, остается в устойчивом состоянии. Он остается стабильным даже при температуре высушивания до 100°C . Синтетический этtringит, который кристаллизовался при более низком показателе pH ($10 \div 11,5$), разрушился уже через 48 часов при хранении на воздухе. Таким образом, стабильность этtringита, как составной части структуры расширяющегося цемента, зависит от его морфологии. При производстве расширяющегося цемента путём смешивания товарного портландцемента с расширяющимися компонентами на сульфoалюминатной основе, этtringит образуется в сильной щелочной среде, главным образом, в форме кристаллических игл с отношением длина/диаметр равным $18 \div 22$. При введении в состав расширяющегося цемента щелочных компонентов, повышающих pH до 13 и выше, этtringит образуется в плотной мелко кристаллической форме с $L/D = 1 \div 3$. Этtringит с такой морфологией обладает наивысшей стабильностью при различных условиях хранения. Исследования долговечности железобетонных конструкций (элементы крыши без кровли) на основе напрягающихся цементов, которые были, эксплуатировались в период до 20 лет при экстремально сухих и жарких метеорологических условиях, вследствие развития усадочных деформаций,

показали потери самоупрочнения до 55 % и снижение прочности только около 10 %. При этом, оставшийся уровень самоупрочнения, прочности, водонепроницаемости и морозостойкости, были существенно выше, чем для бетонов на основе портландцемента. Этот факт является дополнительным доказательством того, что применении расширяющихся цементов для изготовления бетонных и железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в экстремально сложных условиях, обеспечивается существенно более высокое качество, чем в случае применения бетонов на портландцементе.

2. Исследования составов и свойств самоуплотняющегося мелкозернистого бетона

2. Compositions and properties of self-compacting fine-grained concrete reserch

Требуемые эксплуатационные свойства самоуплотняющихся мелкозернистых бетонов, при которых одновременно сочетаются высокая прочность, трещиностойкость и долговечность бетонов, могут быть достигнуты путём введения в состав базового портландцемента тонкодисперсных микронаполнителей, оказывающих активное влияние развитие процессов структурообразования и свойства МЗБ [1]. В этой связи, основной целью выполненных исследований явилось получение самоуплотняющихся высокопрочных мелкозернистых бетонов с полидисперсными модификаторами. В качестве тонкодисперсного модификатора использовалась смесь микрокремнезёма и расширяющей добавки на сульфоалюминатной основе, стоящая из смеси ангидрита и метакеолина в стехиометрическом соотношении, необходимом для образования этtringита [2; 7]. Введение гиперпластификатора, при низких значениях В/Ц, способствует образованию цементного теста, которое заполняет межзерновую пустоту заполнителя с равномерным распределением по его поверхности, обеспечивая высокую подвижность смеси [3]. Использование наполнителей, с содержанием наночастиц с размером менее 1 мкм, приводит не только к повышению плотности материала, но и к обеспечению слитности структуры. Кроме того, формируется плотная и прочная контактная зона цементного камня и заполнителя. Введение в состав базового портландцемента комплексного модификатора с расширяющейся добавкой, обеспечивает на начальном этапе формирования структуры цементного камня отсутствие растягивающих напряжений вследствие развития усадочных деформаций, следствием чего является повышенная плотность, непроницаемость и трещиностойкость МЗБ [8–10]. Это является важным показателем качества МЗБ в сочетании с высокими прочностными показателями, особенно при воздействии изгибающих и растягивающих усилий.

При выполнении экспериментальных исследований применялись следующие материалы:

- Портландцемент Воскресенского цементного завода марки М500, с нормальной густотой 27,5 %, удовлетворяющих требованиям ГОСТ 10178.
- Карьерный кварцевый песок, с модулем крупности 1,4 и содержанием пылеватых частиц 6,2 %, относящийся к очень мелким пескам 2-го класса, не соответствующий требованиям ГОСТ 8736, который классифицируется как некондиционный песок.
- В качестве наполнителя применяли микрокремнезем Новокузнецкого ферросплавного завода с содержанием оксидов в %: SiO_2 — 87; Al_2O_3 — 1,7; Fe_2O_3 — 2; MgO — 0,8; SO_3 — 0,6; CaO — 2,3; R_2O — 2,5; п.п.п — 1,6. Насыпная плотность — 0,2–0,25 г/см³, плотностью 2,2 г/м³ удельная поверхность 20 000 см²/г.
- В качестве пластифицирующей добавки применяли суперпластификатор «Sika ViscoCrete 4330».
- В качестве расширяющей добавки, на основе сульфоалюмината кальция, применяли смесь метакаолина и ангидрита в соотношении, необходимом для образования этtringита.

Расход РД составлял 10 % и 15 %, а расход микрокремнезема 5 % от массы цемента, с использованием суперпластификатора «ViscjCrete — 4330» в количестве 0,6 % от массы цемента. В процессе развития гидратации РД образуется этtringит в форме развитых кристаллов, габитус которых характеризуется соотношением длина/диаметр 14–20 (рис. 1).



Рисунок 1. Размещение тонких кристаллов этtringита с соотношением длина/диаметр 14–20 в поровом пространстве цементного камня (разработано авторами)

Figure 1. Placement of thin ettringite crystals with length/diameter ratio 14–20 in the pore space of hardened cement paste (developed by the authors)

Установлено, что диаметр зёрен расширяющейся добавки изменяется в диапазоне от $0,2\ \mu\text{m}$ до $10\ \mu\text{m}$ с удельной поверхностью порошка до $8\ 000\ \text{см}^2/\text{г}$, что обеспечивает дисперсность существенно выше, чем базового ПЦ и предполагает преимущественное распределение расширяющейся добавки в его межзерновом пространстве.

Были проведены исследования влияния комплексной добавки, состоящей из расширяющейся добавки и микрокремнезема, на свойства бетонной смеси и прочность мелкозернистого бетона.

Введение в состав МЗБ оптимального количества микронаполнителей обеспечивает существенное повышение связанности смеси при одновременном повышении её подвижности и удобоукладываемости.

Это является следствием вытеснения избыточной воды из межзернового пространства базового портландцемента, а распределение в структуре вяжущего зёрен микронаполнителя способствует формированию устойчивого каркаса микробетона, снижая величину усадочных деформаций [10–12].

При введении в состав МЗБ расширяющейся добавки на основе сульфоалюминаты кальция, кроме замещения межзерновой воды, устраняется вредное влияние усадочных деформаций на структуру твердеющего цементного камня.

Введение в состав МЗБ микрокремнезёма, оказывает активное влияние на развитие физических, физико-химических и гидратационных процессов, сопровождающихся образованием гидросиликатов кальция, способствующих упрочнению и уплотнению структуры цементного камня.

С целью получения самоуплотняющегося МЗБ с компенсированной усадкой исследовались составы с различным содержанием РД на основе сульфоалюмината кальция в виде смеси метакеолина, тонкодисперсного ангидрита и микрокремнезёма.

Одной из основных задач применяемой добавки является заполнение межзернового пространства базового портландцемента, снижая водопотребность вяжущего при одновременном улучшении реологических характеристик [12–14].

Экономическая обоснованность использования микрокремнезёма и метакеолина, как микронаполнителей, определяется отсутствием необходимости их дополнительного измельчения, поскольку они имеют достаточно высокую дисперсность до $5\ \mu\text{m}$, необходимую для эффективного размещения в межзерновом пространстве базового цемента [8; 9; 11].

Таблица 1 / Table 1

Состав продуктов гидратации композиционных вяжущих

Composition of hydration products of composite binders

Наименование минерала или продукта гидратации цемента <i>Name of mineral or cement hydration product</i>	Содержание продуктов гидратации в составе цементного камня, % <i>Content of hydration products in cement stone composition, %</i>					Межплоскостное расстояние d, Å <i>Interplanar distance d, Å</i>	Химическая формула <i>Chemical composition</i>
	ПЦ*	ПЦ + МК* (5 %)	ПЦ + РД* (10 %)	ПЦ + РД (10 %) + МК	ПЦ + РД (15 %) + МК		
Этtringит <i>Ettringite</i>	4,1	4,2	8,9	11,8	13,1	9,90–9,70; 5,627; 3,892; 3,496; ...	$\text{Ca}_6[\text{Al}(\text{OH})_6]_2 \cdot 24\text{H}_2\text{O} \cdot (\text{SO}_4)_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Портландит <i>Portlandite</i>	16,5	12,6	14,6	13,1	13,2	7,16; 3,57; 2,38; 1,78; 1,43 ...	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
Гидросиликаты кальция <i>Hydrated calcium silicate</i>	57,5	62,1	58,5	63,5	64,2	11,812–10,049; 3,071; 2,825; 1,851	$x\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$; [C-S-H]
Двухкальциевый алюминат 8-водный <i>Dicalcium aluminate 8-hydrate</i>	0,9	1,1	1,3	1,5	2,0	10,824–10,012; 2,870; 2,544; ...	$2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$; [C ₂ AH ₈]
Трехкальциевый гидроалюминат 6-водный <i>Tricalcium aluminate 6-hydrate</i>	1,6	1,8	2,1	2,6	2,9	5,168; 2,805; 2,300; 2,042; ...	$\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{OH})_{12}$; [C ₃ AH ₆]
Другие неорганические компоненты <i>Other inorganic components</i>	19,1	18,2	14,6	7,5	4,6	—	—

Примечание. Твердение в условиях гидротермальной обработки при 60°C, 48 час. Степень гидратации цемента 92–96 %; * ПЦ — портландцемент; МК — микрокремнезем; РД — расширяющая добавка. Разработано авторами / Note. Curing under hydrothermal treatment conditions at 60°C, 48 h. Degree of cement hydration 92–96 %; * ПЦ — portland cement; МК — microsilica; РД — expanding admixture. Developed by the authors

На основании анализа экспериментальных исследований продуктов гидратации композиционных вяжущих было установлено, что комплексная минеральная добавка принимает достаточно активное участие в развитии процессов структурообразования цементного камня (табл. 1).

При исследовании свойств СУ МЗБ применялись смеси с подвижностью 440–530 мм по расплыву стандартного конуса, которая обеспечивалась введением соответствующего количества суперпластификатора и корректировкой В/В.

Анализ развития процессов расширения-усадки твердеющего МЗБ с различными микронаполнителями показал, что введение в его состав гидравлически активного микрокремнезёма сопровождается увеличением величины усадки на 4 % при одновременном увеличении прочности при

сжатии на 7 % по сравнению с прочностью МЗБ, приготовленного на основе базового портландцемента (рис. 2), что может отрицательно сказаться его трещиностойкости и долговечности.

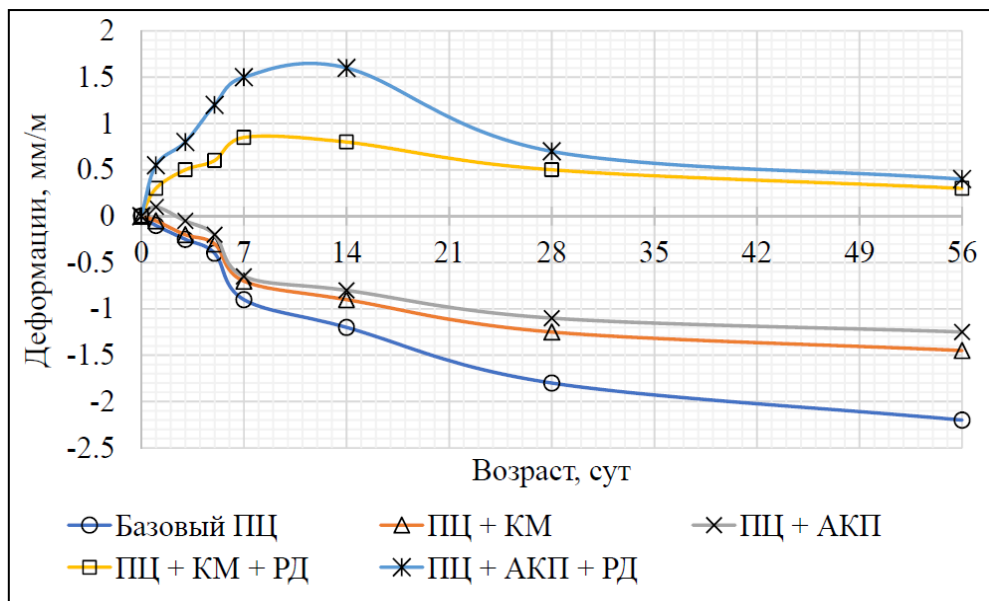
Таблица 2 / Table 2

Составы самоуплотняющихся мелкозернистых бетонов

Compositions of self-compacting fine-grained concrete

№, п/п Sequential number	Расход компонентов, кг/м ³ Consumption of components, kg/m ³				Свойства СУ МЗБ Properties of self-compacting fine-grained concrete		
	базовый ПЦ basic portland cement	микронаполнитель microfiller	вода water	песок sand	средняя плотность, кг/м ³ mass specific gravity, kg/m ³	прочность при сжатии, 28 сут, МПа strength of compression, 28 days, MPa	общая пористость, % total porosity, %
1	550	—	235	1415	2 200	40,5	15,5
2	520	30 (МК)	248	1 380	2 178	43,4	14,0
3	495	55 (РД)	240	1 395	2 185	48,4	13,4
4	465	30 (МК) 55 (РД)	252	1 415	2 217	52,3	12,1
5	437	30 (МК) 83 (РД)	255	1 410	2 215	55,8	11,6

* ПЦ — портландцемент; МК — микрокремнезем; РД — расширяющая добавка.
Разработано авторами / * ПЦ — portland cement; МК — microsilica; РД — expanding
admixture. Developed by the authors



1 — ПЦ; 2 — ПЦ + МК (5 %); 3 — ПЦ + РД (10 %); 4 — ПЦ + МК + РД (10 %); 5 — ПЦ + МК + РД (15 %)

Рисунок 2. Кинетика деформаций МЗБ на основе композиционных вяжущих (разработано авторами)

Figure 2. Strain kinetics of fine-grained concrete based on composite binders (developed by the authors)

Исследование кинетики процессов гидратации, выполненное с применением физико-химических методов, позволило установить, что наряду с продуктами гидратации, характерными для базового портландцемента

в виде этtringита, портландита, моносulfата, преобладающим является образование гидросиликатов различной основности (табл. 1). Это обусловлено участием микрокремнезёма в процессах гидратации, путём связывания с гидроксидом кальция и образованием низкоосновных гидросиликатов. При этом, этtringит, образующийся в результате гидратации расширяющейся добавки, кристаллизуется преимущественно в поровом пространстве цементного камня, упрочняя и уплотняя его.

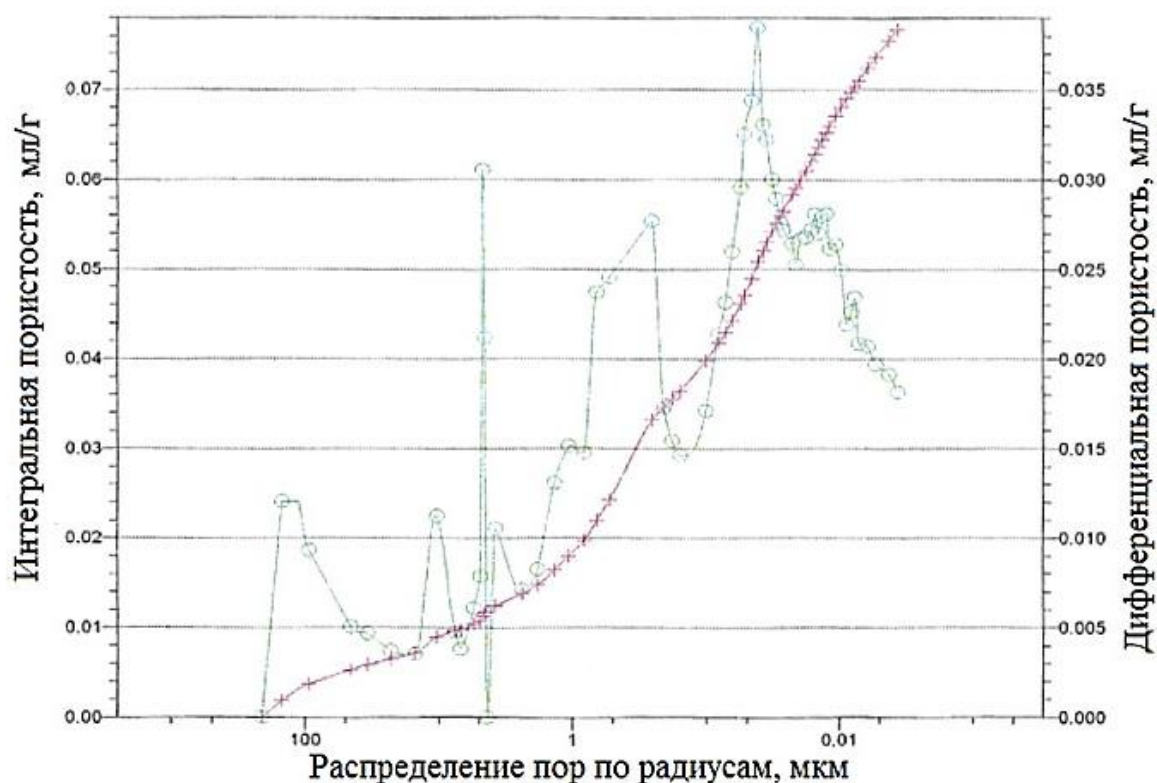
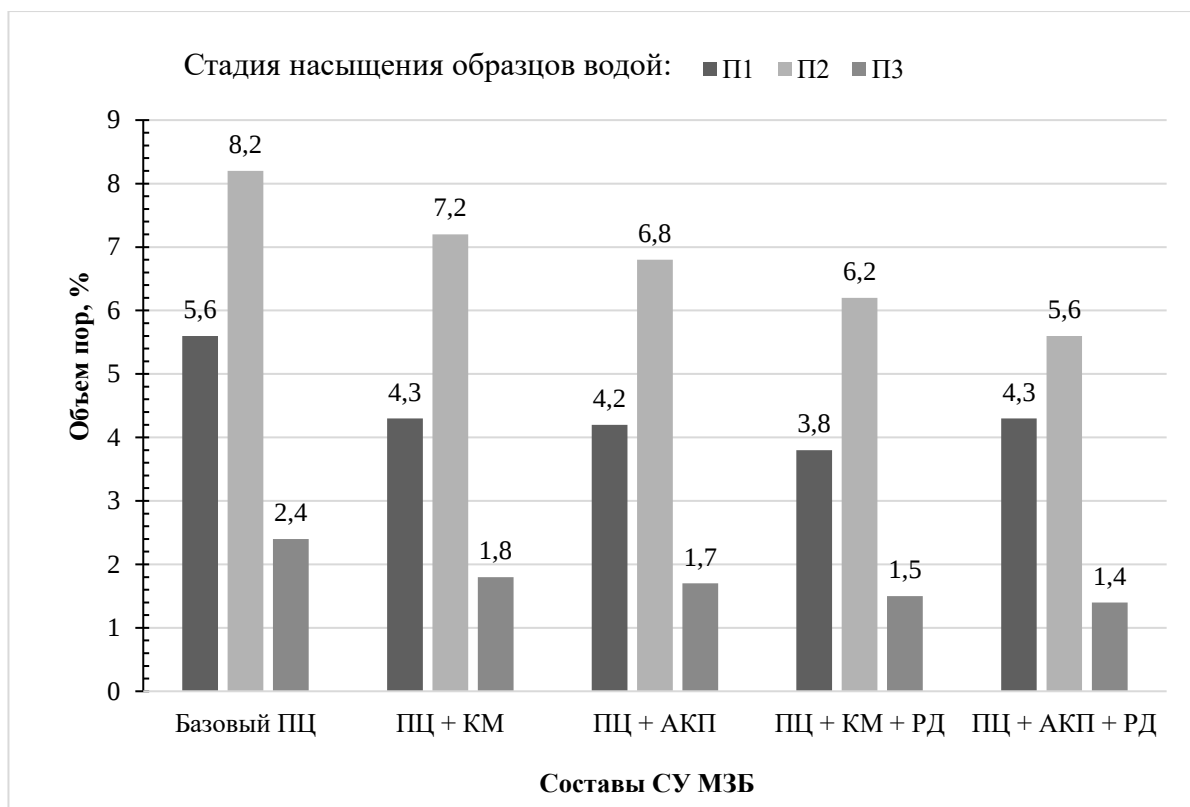


Рисунок 3. Анализ поровой структуры МЗБ на основе композиционного вяжущего (№ 5 таблица 2) (разработано авторами)

Figure 3. Analysis of pore structure of fine-grained concrete based on composite binder (No. 5 table 2) (developed by the authors)

Исследование поровой структуры МЗБ, приготовленного на основе композиционного вяжущего, состоящего из смеси микрокремнезёма и расширяющейся добавки, выполнялось с применением метода ртутной порометрии. При этом установлено, что в структуре МЗБ содержится до 7 % гелевых пор, диаметром до 100 нм, и 5 % пор размером 100–600 нм, являющихся наиболее опасными для структуры бетона при замораживании, а также 5 % крупных пор и капилляров размером более 600 нм (рис. 3).

Результаты анализа поровой структуры, выполненные с применением ртутной порометрии, тесно коррелируются с результатами исследования пористости по методу 3-стадийного насыщения водой: при контакте с водой (П1), под водой (П2) и под вакуумом (П3) (рис. 4).



* ПЦ — портландцемент; МК — микрокремнезем; РД — расширяющая добавка; АКП — механохимическая активация песка; КМ — карбонатная мука

* ПЦ — portland cement; МК — microsilica; РД — expanding admixture; АКП — mechanochemical activation of sand; КМ — carbonate flour

Рисунок 4. Характеристика поровой структуры СУ МЗБ при насыщении водой [15]

Figure 4. Characteristics of the pore structure of self-compacting fine-grained concrete when saturated with water [15]

При этом установлено, что минимальный объем второй группы пор «П2», главным образом отрицательно сказывающихся на долговечности бетона, имеют составы с содержанием микронаполнителя, представленного смесью микрокремнезёма с расширяющейся добавкой.

Одним из важных параметров, косвенно определяющих долговечность бетона, является его трещиностойкость.

Оценка трещиностойкости модифицированного МЗБ выполнялась по величине коэффициента вязкого разрушения (K_c), который находится в тесной корреляционной зависимости с морозостойкостью бетона.

Определение вязкости разрушения выполнялось в соответствии с требованиями ГОСТ 29167-91. Как видно из таблицы 3 величина K_c , установленная экспериментально для составов МЗБ на основе композиционных вяжущих, характеризует их высокую трещиностойкость и повышенную долговечность.

Таблица 3 / Table 3

Свойства самоуплотняющихся мелкозернистых бетонов

Properties of self-compacting fine-grained concrete

№, п/п Sequential number	Составы СУ МЗБ в соответствии с таблицей 2 Compositions of self-compacting fine- grained concrete according to table 2	Прочность, 28 сут, МПа Strength, 28 days, MPa		Коэффициент вязкого разрушения, Кс, Мн/м ^{3/2} Viscous fracture coefficient, Kc, MN/m ^{3/2}
		при сжатии under compression	при растяжении under tension	
1	Базовый ПЦ Basic portland cement	40,5	2,82	2,12
2	на основе ПЦ + МК on the basis of portland cement + microsilica	43,4	3,18	2,54
3	на основе ПЦ + РД (10 %) on the basis of portland cement + expanding additive (10 %)	48,4	3,58	3,45
4	на основе ПЦ + МК + РД (10 %) on the basis of portland cement + microsilica + expanding additive (10 %)	52,3	3,86	3,51
5	на основе ПЦ + МК + РД (15 %) on the basis of portland cement + microsilica + expanding additive (15 %)	55,8	4,25	3,94

* ПЦ — портландцемент; МК — микрокремнезем; РД — расширяющая добавка.
Разработано авторами / * ПЦ — portland cement; МК — microsilica; РД — expanding
admixture. Developed by the authors

На основании анализа результатов исследования морозостойкости МЗБ дилатометрическим методом было установлено, что все исследуемые составы имеют морозостойкость не менее F250. При этом было установлено, что после 56 циклов замораживания-оттаивания величина динамического модуля упругости МЗБ практически не изменилась, что подтверждает высокую устойчивость макро- и микроструктуры в процессе испытания на морозостойкость и характеризует его повышенную долговечность.

Выводы

Conclusions

Введение в состав мелкозернистого бетона тонкодисперсных минеральных наполнителей с различной гидравлической активностью позволяет получать самоуплотняющиеся мелкозернистые бетоны с компенсированной усадкой или остаточным расширением, что обеспечивает их повышенную трещиностойкость и долговечность. Введение в состав базового портландцемента комплексной полиминеральной добавки, состоящей из микрокремнезёма и расширяющейся добавки на сульфоалюминатной основе позволяет получать высококачественный мелкозернистый самоуплотняющийся бетон на основе некондиционных

кварцевых песков для строительства транспортных сооружений различного назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Штарк, Й.** Цемент и известь / Й. Штарк, Б. Вихт. — пер. с нем. А. Тулаганова, Под ред. П. Кривенко. — Киев: [б. и.], 2008. — 469 с. — URL: <https://jcement.ru/reading/books/y-shtark-b-vikht-tsement-i-izvest/>. (дата обращения: 02.03.2014).
2. **Штарк, Й.** Долговечность бетона / Й. Штарк, Б. Вихт. — Киев: Оранта, 2004. — 295 с. — URL: <https://jcement.ru/reading/books/shtark-y-vikht-b-dolgovechnost-betona/>. (дата обращения: 02.03.2014).
3. **Дятлов, А.К.** Мелкозернистые самоуплотняющиеся бетоны для монолитного домостроения на основе композиционных вяжущих / А.К. Дятлов, А.И. Харченко, М.И. Баженов, И.Я. Харченко // Промышленное и гражданское строительство. — 2012. — № 11. — С. 59–61. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18189472>. — EDN PIBBAT. (дата обращения: 11.03.2014).
4. **König, G.** Selbstverdichtender Beton [Самоуплотняющийся бетон] / G. König, K. Holschemacher, F. Dehn. — Берлин: Verlag GmbH, 2001. — 249 с. — URL: https://www.researchgate.net/publication/281105208_Selbstverdichtender_Beton (дата обращения: 02.03.2014). — (На нем. яз.).
5. **Okamura, H.** Self-Compacting Concrete / H. Okamura, M. Ouchi. — DOI <https://doi.org/10.3151/jact.1.5> // Journal of Advanced Concrete Technology. — 2003. — Т 1. — № 1. — С. 5–15. — URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jact/1/1/1_1_5/article. (дата обращения: 02.03.2014).
6. **Ozawa, K.** Development of High Performance Concrete / K. Ozawa, K. Maekawa, H. Okamura // Journal of The Faculty of Engineering, the University of Tokyo (B). — 1992. — Т XLI. — № 3. — С. 381–439. — URL: https://www.researchgate.net/publication/285281222_Development_of_High_Performance_Concrete. (дата обращения: 11.03.2014).
7. **Гайфуллин, А.Р.** Влияние добавок глинистых в портландцемент на прочность при сжатии цементного камня / А.Р. Гайфуллин, Р.З. Рахимов, Н.Р. Рахимова. — DOI <https://doi.org/10.5862/MCE.59.7> // Инженерно-строительный журнал. — 2015. — № 7. — С. 66–73. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25024312>. (дата обращения: 02.03.2014).
8. **Михайлов, В.В.** Расширяющийся и напрягающий цементы и самоуплотняющиеся железобетонные конструкции / В.В. Михайлов, С.Л. Литвер. — Москва: Стройиздат, 1974. — 312 с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007376252>. (дата обращения: 02.03.2014).
9. Технология напрягающего цемента и самоуплотняющихся железобетонных конструкций / С.Л. Литвер, Л.И. Будагянц, А.П. Чушкин [и др.]. — Москва: Стройиздат, 1975. — 183 с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006978148>. (дата обращения: 02.03.2014).
10. **Ерошкина, Н.А.** Структурообразование геополимеров / Н.А. Ерошкина, М.О. Коровкин, Е.И. Тымчук // Молодой ученый. — 2015. — № 7. — С. 123–126. — URL: <https://moluch.ru/archive/87/17057/>. (дата обращения: 11.03.2014).
11. **Li, W.** Sulphate effect on the early age strength and self-desiccation of cemented paste backfill / W. Li, M. Fall. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.124> // Construction and Building Materials. — 2016. — Т 106. — С. 296–304. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061815307959>. (дата обращения: 11.03.2014).
12. **Horkoss, S.** The effect of the source of cement SO₃ on the expansion of mortars / S. Horkoss, G. Escadeillas, T. Rizk, R. Lteif. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2015.12.004> // Case Studies in Construction Materials. — 2016. — Т 4. — С. 62–72. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221450951530019X>. (дата обращения: 11.03.2014).
13. **Carballosa, P.** Influence of cement and expansive additive types in the performance of self-stressing and self-compacting concretes for structural elements / P. Carballosa, J.L. García Calvo, D. Revuelta, J. J. Sánchez, J. P. Gutiérrez. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.113> // Construction and Building Materials. — 2015. — Т 93. — С. 223–229. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061815006352>. (дата обращения: 11.03.2014).

14. **Wang, B.** Prediction of expansion behavior of self-stressing concrete by artificial neural networks and fuzzy inference systems / B. Wang, T. Man, H. Jin. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.059> // Construction and Building Materials. — 2015. — Т 84. — С. 184–191. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061815003062>. (дата обращения: 11.03.2014).
15. **Харченко, И.Я.** Эффективный самоуплотняющийся мелкозернистый бетон с компенсированной усадкой / И.Я. Харченко, Д.А. Баженов. — DOI <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-759-5-48-52> // Строительные материалы. — 2018. — № 5. — С. 48–52. — URL: <https://journal-cm.ru/index.php/ru/zhurnaly/2018/vse-stati-za-2018/effektivnyj-samouplotnyayushchijsya-melkozernistyj-beton-s-kompensirovannoj-usadkoj>. — EDN XQONCX. (дата обращения: 11.03.2014).
16. **Дятлов, А.К.** Композиционное вяжущее для мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов / А.К. Дятлов, А.И. Харченко, М.И. Баженов, И.Я. Харченко // Научно-технический вестник Поволжья. — 2012. — № 5. — С. 153–159. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17977978>. — EDN PDKSKX. (дата обращения: 11.03.2014).

Сведения об авторах:

Пискунов Александр Алексеевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Мосты и тоннели», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», e-mail: a.piskunov52@mail.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=807388

Харченко Игорь Яковлевич — кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Мосты и тоннели», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия, e-mail: iharcenko@mail.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=815775

Харченко Алексей Игоревич — кандидат технических наук, докторант, ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия, e-mail: greenstone236@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3850-4285>

Пестрякова Екатерина Алексеевна — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Мосты и тоннели», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия,
e-mail: kate.pestriakova@gmail.com
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=898914

Мазур Евгений Витальевич — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Мосты и тоннели», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия,
e-mail: genha345@mail.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1161926

Карпущина Александра Александровна — ассистент кафедры «Мосты и тоннели», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия, e-mail: aleks.karpukhina@mail.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1209621

Галабурда Игорь Андреевич — инженер 2 категории кафедры «Мосты и тоннели», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия, e-mail: igor.galaburda@yandex.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1089973

Статья получена: 03.05.2024. Принята к публикации: 10.09.2024. Опубликовано онлайн: 24.09.2024.

REFERENCES

1. Stark J., Wicht B. Zement und Kalk [Cement and lime]. Berlin: Birkhäuser Basel; 2000. Available at: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-0348-8382-5> (accessed March 2nd, 2014). (In German) DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-0348-8382-5>.
2. Stark J., Wicht B. Dauerhaftigkeit von Beton [Durability of concrete]. Berlin: Birkhäuser Basel; 2001. Available at: <https://link.springer.com/book/9783764363444> (accessed March 2nd, 2014). (In German).
3. Dyatlov A.K., Kharchenko A.I., Bazhenov M.I., Kharchenko I.Ya. Fine Self-Compacting Concretes for Monolithic Housing Construction on The Basis of Composite Binders. *Industrial and Civil Engineering*. 2012;(11): 59–61. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18189472> (accessed 11th March 2014). (In Russ., abstract in Eng.).

4. König G., Holschemacher K., Dehn F. Selbstverdichtender Beton [Self-compacting concrete]. Berlin: Verlag GmbH; 2001. Available at: https://www.researchgate.net/publication/281105208_Selbstverdichtender_Beton (accessed March 2nd, 2014). (In German).
5. Okamura H., Ouchi M. Self-Compacting Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2003;1(1): 5–15. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3151/jact.1.5>.
6. Ozawa K., Maekawa K., Okamura H. Development of High Performance Concrete. *Journal of The Faculty of Engineering, the University of Tokyo (B)*. 1992;XLI(3): 381–439. Available at: https://www.researchgate.net/publication/285281222_Development_of_High_Performance_Concrete (accessed 11th March 2014). (In Eng.).
7. Gaifullin A.R., Rakhimov R.Z., Rakhimova N.R. The Influence of Clay Additives in Portland Cement on The Compressive Strength of The Cement Stone. *Magazine of Civil Engineering*. 2015;(7): 66–73. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.5862/MCE.59.7>.
8. Mikhaylov V.V., Litver S.L. [Expanding and stressing cements and self-stressed reinforced concrete structures]. Moscow: Stroyizdat; 1974. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007376252> (accessed March 2nd, 2014). (In Russ.).
9. Litver S.L., Budagyants L.I., Chushkin A.P. et al. [Technology of prestressed cement and self-stressed reinforced concrete structures]. Moscow: Stroyizdat; 1975. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006978148> (accessed March 2nd, 2014). (In Russ.).
10. Eroshkina N.A., Korovkin M.O., Tymchuk E.I. [Structural formation of geopolymers]. *Young scientist*. 2015;(7): 123–126. Available at: <https://moluch.ru/archive/87/17057/> (accessed 11th March 2014). (In Russ.).
11. Li W., Fall M. Sulphate effect on the early age strength and self-desiccation of cemented paste backfill. *Construction and Building Materials*. 2016;106: 296–304. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.124>.
12. Horkoss S., Escadeillas G., Rizk T., Lteif R. The effect of the source of cement SO₃ on the expansion of mortars. *Case Studies in Construction Materials*. 2016;4: 62–72. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2015.12.004>.
13. Carballosa P., García Calvo J.L., Revuelta D., Sánchez J.J., Gutiérrez J.P. Influence of cement and expansive additive types in the performance of self-stressing and self-compacting concretes for structural elements. *Construction and Building Materials*. 2015;93: 223–229. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.113>.
14. Wang B., Man T., Jin H. Prediction of expansion behavior of self-stressing concrete by artificial neural networks and fuzzy inference systems. *Construction and Building Materials*. 2015;84: 184–191. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.059>.
15. Harchenko I.Ya., Bajenov D.A. Efficient self-compacting fine concrete with compensated shrinkage. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2018;(5): 48–52. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-759-5-48-52>.
16. Dyatlov A.K., Kharchenko A.I., Bazhenov M.I., Kharchenko I.Ya. Composite Binder for Fine Self-Compacting Concrete. *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*. 2012;(5): 153–159. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17977978> (accessed 11th March 2014). (In Russ., abstract in Eng.).

Information about the authors:

Alexander A. Piskunov — Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,
e-mail: a.piskunov52@mail.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=807388

Igor Ya. Kharchenko — Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,
e-mail: iharcenko@mail.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=815775

Alexey I. Kharchenko — Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,
e-mail: greenstone236@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3850-4285>

Ekaterina A. Pestryakova — Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,
e-mail: kate.pestriakova@gmail.com
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=898914

Evgeny V. Mazur — Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia, e-mail: genha345@mail.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1161926

Alexandra A. Karpukhina — Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,
e-mail: aleks.karpukhina@mail.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1209621

Igor A. Galaburda — Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,
e-mail: igor.galaburda@yandex.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1089973

Submitted: 3rd May 2024. Revised: 10th September 2024. Published online: 24th September 2024.