

**З.У. БЕППАЕВ[✉], Л.Х. АСТВАЦАТУРОВА, С.А. КОЛОДЯЖНЫЙ,
С.А. ВЕРНИГОРА, В.В. ЛОПАТИНСКИЙ**

Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство»,
2-я Институтская ул., д. 6, к. 5, г. Москва, 109428, Российская Федерация

ПОДБОР СОСТАВОВ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ САМОУПЛОТНЯЮЩИХСЯ БЕТОНОВ НА ОСНОВЕ ВТОРИЧНЫХ (РЕЦИКЛИНГОВЫХ) ЩЕБНЯ И ПЕСКА

Аннотация

Введение. Замена традиционных (природных) заполнителей на промышленные отходы при производстве бетонов является одним из важнейших резервов экономии материальных и энергетических ресурсов в строительной индустрии Российской Федерации. Лом бетонных, железобетонных конструкций и изделий, который образуется при сносе физически и морально устаревших зданий и сооружений, а также при их разрушении после природных катастроф и вооруженных конфликтов, относится с точки зрения утилизации в технологии бетонов к наиболее перспективным отходам. Использование бетонных отходов практически позволит обеспечить внедрение важнейшего принципа безотходности технологических процессов (при производстве сборных и монолитных бетонных и железобетонных конструкций) и создать условия для выполнения важных социальных, экономических и экологических задач.

Цель. Подбор составов и исследование нормируемых параметров самоуплотняющихся бетонов на основе рециклинговых (бетонных) щебня и песка с использованием в качестве минеральной добавки мелких фракций рециклингового песка, а также сравнение их свойств с аналогичными по составу самоуплотняющимися бетонами на основе природного щебня и песка.

Материалы и методы. Для проведения исследований в качестве крупного заполнителя использовали рециклинговый (бетонный) и гранитный (природный) щебень по ГОСТ 8267-93. В качестве мелкого заполнителя использовали рециклинговый (бетонный) и природный песок по ГОСТ 8736-2014. В качестве минеральной добавки применяли мелкие фракции рециклингового песка. В качестве вяжущего приме-

няли портландцемент по ГОСТ 31108-2020. В качестве добавки применяли суперпластификатор «Полипласт Таргет» по ГОСТ 24211-2008. Воду затворения применяли по ГОСТ 23732-2011.

Результаты. Реологические свойства, морозостойкость и истираемость мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе рециклинговых заполнителей идентичны аналогичным показателям самоуплотняющихся бетонов на основе традиционных заполнителей. Прочность, плотность и марка по водонепроницаемости мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе рециклинговых заполнителей ниже аналогичных показателей мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе традиционных заполнителей.

Выводы. По результатам проведенной работы выявлено, что вторичные (рециклинговые) щебень и песок, а также мелкие фракции вторичного (рециклингового) песка (удельной поверхностью не ниже 230 м²/кг) пригодны для производства самоуплотняющихся бетонов. Самоуплотняющиеся бетоны на основе вторичных (рециклинговых) щебня и песка могут наравне с самоуплотняющимися бетонами на основе традиционных щебня и песка применяться в строительной отрасли Российской Федерации.

Ключевые слова: рециклинг, продукты утилизации бетонных и железобетонных конструкций, самоуплотняющийся бетон, мелкозернистые самоуплотняющиеся бетонные смеси, рециклинговые щебень и песок, минеральные добавки

Для цитирования: Беппаев З.У., Аствацатурова Л.Х., Колодяжный С.А., Вернигора С.А., Лопатинский В.В. Подбор составов и исследование свойств мелко-

зернистых самоуплотняющихся бетонов на основе вторичных (рециклинговых) щебня и песка // *Бетон и железобетон*. 2024. № 5 (624). С. 33–44. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-6\(625\)-33-44](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-6(625)-33-44). EDN: MNCZEZ

Вклад авторов

Беппаев З.У. – руководство работой, анализ результатов, подготовка статьи.

Аствацатурова Л.Х. – анализ результатов, подготовка и оформление статьи.

Колодяжный С.А. – выполнение экспериментальной части, подготовка статьи.

Вернигора С.А., Лопатинский В.В. – выполнение экспериментальной части.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 15.10.2024

Поступила после рецензирования 03.11.2024

Принята к публикации 07.11.2024

**Z.U. BEPPAEV✉, L.H. ASTVATSATUROVA, S.A. KOLODYAZHNY,
S.A. VERNIGORA, V.V. LOPATINSKY**

Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev,
JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 5, Moscow, 109428, Russian Federation

SELECTION OF COMPOSITIONS AND INVESTIGATION OF PROPERTIES OF FINE—GRAINED SELF—COMPACTING CONCRETES BASED ON SECONDARY (RECYCLING) CRUSHED STONE AND SAND

Abstract

Introduction. The replacement of traditional (natural) aggregates with industrial waste in the production of concrete is one of the most important reserves for saving material and energy resources in the construction industry of the Russian Federation. Scrap of concrete, reinforced concrete structures and products, which is formed during the demolition of physically and morally outdated buildings and structures, as well as during their destruction after natural disasters and armed conflicts, is one of the most promising wastes from the point of view of recycling in concrete technology. The use of concrete waste will practically ensure the implementation of the most important principle of waste-free technological processes (in the production of prefabricated and monolithic concrete and reinforced concrete structures) and create conditions for the fulfillment of important social, economic and environmental tasks.

Aim. Selection of compositions and study of the standardized parameters of self-compacting concretes based on recycled (concrete) crushed stone and sand using fine

fractions of recycled sand as a mineral additive, as well as comparing their properties with self-compacting concretes based on natural crushed stone and sand of a similar composition.

Materials and methods. For the research, recycled (concrete) and granite (natural) crushed stone according to State Standard 8267-93 were used as coarse aggregates. Recycled (concrete) and natural sand according to State Standard 8736-2014 were used as fine aggregates. Fine fractions of recycled sand were used as a mineral additive. Portland cement according to State Standard 31108-2020 was used as a binder. The superplasticizer Polyplast Target according to State Standard 24211-2008 was used as an additive. The mixing water was used according to State Standard 23732-2011.

Results. The rheological properties, frost resistance and abrasion resistance of fine-grained self-compacting concretes based on recycled aggregates are identical to those of self-compacting concretes based on the traditional aggregates. The strength, density and waterproof grade of fine-grained self-compacting concretes based on recycled

aggregates are lower than those of fine-grained self-compacting concretes based on traditional aggregates.

Conclusions. Based on the results of the work carried out, it was revealed that secondary (recycled) crushed stone and sand, as well as fine fractions of secondary (recycled) sand (with a specific surface area of at least 230 m²/kg), are suitable for the production of self-compacting concretes. Self-compacting concretes based on secondary (recycled) crushed stone and sand can be used in the construction industry of the Russian Federation along with self-compacting concretes based on traditional crushed stone and sand.

Keywords: recycling, recycling products of concrete and reinforced concrete structures, self-compacting concrete, fine-grained self-compacting concrete mixtures, recycled crushed stone and sand, mineral additives

For citation: Beppaev Z.U., Astvatsaturova L.H., Kolodyazhny S.A., Vernigora S.A., Lopatinsky V.V. Selection of compositions and investigation of properties of fine-grained self-compacting concretes based on secondary (recycling) crushed stone and sand. *Beton i Zhelezobeton*

[Concrete and Reinforced Concrete]. 2024, no. 5 (624), pp. 33–44. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5\(624\)-33-44](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5(624)-33-44). EDN: MNCZEZ

Authors contribution statement

Beppaev Z.U. – management of work, analysis of results, preparation of an article.

Astvatsaturova L.H. – analysis of results, preparation and design of the article.

Kolodyazhny S.A. – implementation of the experimental part, preparation of the article.

Vernigora S.A., Lopatinsky V.V. – execution of the experimental part.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 15.10.2024

Revised 03.11.2024

Accepted 07.11.2024

Введение

Замена традиционного сырья на промышленные отходы при производстве строительных материалов обычно приводит к снижению качества конечной продукции. В связи с этим отходы и побочные продукты промышленности за редким исключением традиционно рассматриваются как низкокачественное сырье. Эффективное использование отходов возможно только при разработке новых или модификации существующих технологий, в которых учитываются потенциальные возможности сырья для достижения необходимых свойств получаемой из отходов продукции.

Лом бетонных, железобетонных конструкций и изделий, который образуется при сносе физически и морально устаревших зданий и сооружений, а также при их разрушении после природных катастроф и вооруженных конфликтов, относится с точки зрения утилизации в технологии бетонов к наиболее перспективным отходам. При дроблении бетонного лома образуются рециклинговые (вторичные) щебень и песок. В настоящее время имеется опыт использования рециклингового (бетонного) лома в виде щебня в качестве крупного заполнителя для низкопрочных бетонов и для засыпки дорожных оснований. Однако при переработке бетонного лома в щебень образуются мелкие и ультрамелкие пески дробленого бетонного лома, объемы которых составляют 30–35 % от переработанного бетона. Эти пески из дробленого бетонного лома представляют собой частицы размером от 0 до 5 мм. На дробильно-сортировочных площадках образуются огромные отвалы этого песка, которые в строительной индустрии страны не используются. При этом такие пески либо выбрасываются

на загородные полигоны, либо остаются в отвалах на данной площадке, загрязняя окружающую среду.

Рациональным решением такой важной экологической проблемы будет являться утилизация песков бетонного лома путем их использования в качестве мелких заполнителей и активных микрозаполнителей, в том числе для уменьшения расхода цемента в бетонных и растворных смесях общестроительного назначения. При этом одной из наиболее перспективных областей применения рециклингового (вторичного) песка с размерами зерен менее 1 мм является их использование в качестве минеральной добавки для самоуплотняющегося бетона (СУБ). В рецептуре самоуплотняющихся бетонов используются большие объемы ультрамелких и мелких фракций наполнителей, которые обеспечивают раздвижку зерен мелкого заполнителя, что наряду с применением высокоэффективных суперпластификаторов является необходимым условием высокой текучести смеси.

Повышение подвижности бетонной смеси без снижения прочностных и основных физико-механических характеристик бетона было и остается одной из актуальнейших задач, стоящих перед производителями и потребителями бетона. Это связано как с экономией материальных, энергетических и трудовых ресурсов при использовании более подвижных бетонных смесей, так и с повышением качества готовых конструкций и изделий за счет более однородной структуры бетона и лучшего качества поверхности.

Резкому увеличению подвижности бетонной смеси способствовали разработанные (изобретенные) в 20–30-х гг. прошлого века пластификаторы для бетона на лигносульфонатной основе. С применением пластификаторов стали получать «литые бетонные

смеси», которые применяли для строительства массивных сооружений, проблематичных с точки зрения уплотнения бетонной смеси. Однако «литая» консистенция бетонной смеси в то время достигалась значительным увеличением водоцементного отношения и расхода цемента по сравнению с «трамбованным» и «пластичным» бетоном, что не позволяло получить высокопрочный материал. Дальнейшее развитие высокоподвижных смесей получили в конце 60-х – в начале 70-х годов прошлого века. Тогда был изобретен суперпластификатор для бетона на меламин- и нафталинформальдегидной основе, позволяющий получить подвижную бетонную смесь с относительно малым водоцементным отношением. Опыт применения подобных материалов показал преимущества введения суперпластификаторов в бетонную смесь. Однако были выявлены и отрицательные факторы – большинство суперпластификаторов первого поколения, особенно при больших дозировках, замедляло схватывание и твердение бетонной смеси. При транспортировке бетонов в течение 60–90 минут эффект от действия добавки снижался и уменьшалась подвижность, подача смеси по трубопроводу к месту укладки на расстояние свыше 200–250 м вызывало расслоение смеси. В результате время выполнения работ по бетонированию возрастало, ухудшалось качество поверхности изделий и снижалась прочность бетона. В 80–90-х гг. XX века в Японии профессором Хаймой Окамурой была разработана высокоэффективная добавка – суперпластификатор нового поколения на базе эфиров полиакрилатов и поликарбоксилатов, значительно повышающая реологические свойства бетонной смеси. Ему удалось создать бетон с высокой подвижностью при низком содержании воды. Совместно с Окамурой в создании и развитии высокоподвижных бетонов принимали участие профессора К. Маекава и К. Озава [1]. С начала 1990-х гг. самоуплотняющийся бетон стал объектом интенсивных научных исследований во многих странах Европы. В 2000–2001 годах в Институте строительных исследований в городе Аахен под руководством профессора В. Брамесхубера были проведены глубокие исследования свойств самоуплотняющегося бетона, по результатам которых в ноябре 2003 года Немецким комитетом по железобетону был опубликован нормативный документ, где самоуплотняющийся бетон был официально допущен и разрешен к использованию в Европе. В этом документе были изложены термины и связи самоуплотняющегося бетона с другими европейскими нормативными документами и материалами, а также методы их диагностики [2]. В этих работах для производства самоуплотняющихся бетонных смесей использовались природные заполнители.

Возможности применения рециклинговых (вторичных) щебня и песка в качестве заполнителей, а также мелких фракций песка в качестве минеральной добавки для производства самоуплотняющихся бетонов

были изучены рядом отечественных авторов [3–6]. В проведенных исследованиях для самоуплотняющихся бетонов применяли рециклинговый (вторичный) щебень с природным песком или рециклинговый (вторичный) щебень с равными долями рециклингового (вторичного) и природного песка. Кроме того, в этих работах были рассмотрены вопросы применения тонкодисперсных песков из бетонного лома для производства строительных растворов. Анализ результатов проведенных исследований показал, что замена гранитного щебня на рециклинговый (вторичный) щебень из бетонного лома в самоуплотняющемся бетоне приводит к снижению плотности и прочности на 10–15 %. Самоуплотняющийся бетон, полученный на основе рециклингового (вторичного) щебня из бетонного лома, имеет меньший модуль упругости. Несмотря на ряд проведенных работ по тематике самоуплотняющихся бетонов на основе рециклинговых (вторичных) заполнителей, вопросы, связанные с морозостойкостью, водонепроницаемостью и истираемостью таких бетонов, практически не изучены. Кроме того, не изучены вопросы, связанные с возможностью применения тонкодисперсных рециклинговых песков из бетонного лома в качестве минеральной добавки (наполнителя) для производства самоуплотняющихся бетонов с различными заполнителями.

Целью работы являлся подбор составов и исследование нормируемых параметров мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе рециклинговых (бетонных) щебня и песка с использованием в качестве минеральной добавки мелких фракций рециклингового песка, а также сравнение их свойств с аналогичными по составу самоуплотняющимися бетонами на основе природного щебня и песка.

Материалы и методы

Для приготовления мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе вторичных (рециклинговых) щебня и песка, а также на основе традиционных (природных) щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции рециклингового (вторичного) песка в качестве крупного заполнителя применяли рециклинговый (вторичный) щебень (продукт дробления бетона на гранитном щебне), выпускаемый ООО «РЕ-ГРАД», фракций 5–10 мм (марка по дробимости 600, средняя насыпная плотность 1283 кг/м³, водопоглощение 8,35 %), а также гранитный (природный) щебень производства АО «Каменногорское карьероуправление» фракций 5–10 мм (марка по дробимости 1400, средняя насыпная плотность 1421 кг/м³, водопоглощение 1,95 %). Все остальные нормируемые характеристики рециклингового (вторичного) щебня были сопоставимы с характеристиками гранитного (природного) щебня и соответствовали ГОСТ 8267-93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия (с Изменениями № 1–4)» [7].

В качестве мелкого заполнителя применяли рециклинговый (вторичный) песок (мелкие фракции с размерами зерен 1–5 мм, полученные при дроблении бетона на гранитном щебне), выпускаемый ООО «РЕГРАД» (модуль крупности 2,53, насыпная плотность 1354 кг/м³, влажность 8,2 %), а также природный песок производства АО «Богаевский карьер» (модуль крупности 2,39, насыпная плотность 1734 кг/м³, влажность 4,6 %). Все нормируемые характеристики обоих песков соответствовали ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ. Технические условия» [8].

В качестве минеральной добавки в обоих составах самоуплотняющихся бетонов применяли мелкие фракции вторичного (рециклингового) песка с насыпной плотностью 1210 кг/м³ и удельной поверхностью 225–230 м²/кг. В качестве химической добавки применяли суперпластификатор «Полипласт Таргет» производства ООО «ПОЛИПЛАСТ Новомосковский», соответствующий ГОСТ 24211-2008 «Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия» [9].

В качестве вяжущего в обоих составах самоуплотняющихся бетонов применяли портландцемент ЦЕМ II/B-Ш 42,5Н производства ООО «Хайдельберг-ЦементРус», соответствующий ГОСТ 31108-2020 «Цементы общестроительные. Технические условия» [10].

Для приготовления бетонов применяли воду, соответствующую ГОСТ 23732-2011 «Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия» [11].

Для проведения экспериментальных исследований были подобраны идентичные (по расходу цемента и заполнителей) мелкозернистые самоуплотняющиеся бетонные смеси на основе вторичных (рециклинговых) щебня и песка, а также на основе традиционных (природных) щебня и песка с минеральной добавкой (в обоих бетонах) из мелкой фракции рециклингового (вторичного) песка. Были определены нормируемые реологические (расплыв, растворотделение, вязкость, текучесть) свойства самоуплотняющихся бетонных смесей, по значениям которых были определены марки по удобоукладываемости (РК), вязкости (V) и текучести (Т) этих смесей в соответствии ГОСТ Р 59715-2022 «Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Методы испытаний» [12]. Далее из этих мелкозернистых самоуплотняющихся бетонных смесей для определения прочности, плотности, морозостойкости, водонепроницаемости и истираемости были изготовлены бетонные образцы.

Прочность мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных и рециклинговых (вторичных) щебня и песка с применением в качестве минеральной добавки мелких фракций рециклингового песка определяли в соответствии с ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам» [13]. Плотность

бетонов определяли в соответствии с ГОСТ 12730.1-2020 «Бетоны. Методы определения плотности» [14]. Морозостойкость бетонов определяли в соответствии с ГОСТ 10060-2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости» [15]. Водонепроницаемость бетонов определяли в соответствии с ГОСТ 12730.5-2018 «Бетоны. Методы определения водонепроницаемости» [16]. Истираемость бетонов определяли в соответствии с ГОСТ 13087-2018 «Бетоны. Методы определения истираемости» [17].

Результаты

Составы мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных щебня и песка, а также на основе рециклинговых (вторичных) щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции рециклингового (вторичного) песка приведены в табл. 1.

Сравнение реологических свойств мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных щебня и песка, а также на основе рециклинговых (вторичных) щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка приведено в табл. 2.

Анализ полученных результатов показал, что реологические свойства мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных и рециклинговых (вторичных) щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка практически идентичны и соответствуют требованиям ГОСТ Р 59714-2021 «Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Технические условия (EN 206:2013+A2:2021, NEQ)» [18]. Средняя плотность мелкозернистого самоуплотняющегося бетона на основе природных щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка на 8,5 % больше плотности мелкозернистого самоуплотняющегося бетона на основе рециклинговых (вторичных) щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка. Расход воды для мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе рециклинговых (вторичных) щебня и песка на 14 % больше расхода воды для мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных щебня и песка при равных реологических показателях. Это обусловлено большим водопоглощением рециклинговых (вторичных) щебня и песка по сравнению с природными щебнем и песком.

Общие виды мелкозернистых самоуплотняющихся бетонных смесей на основе природных и рециклинговых щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка в процессе определения их реологических свойств приведены на рис. 1–4.

Сравнение основных физико-механических (прочности, плотности, морозостойкости, водонепроницаемости и истираемости) характеристик мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе

Таблица 1

Table 1

Составы мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе рециклинговых (вторичных) щебня и песка, а также на основе природных щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции рециклингового (вторичного) песка
Compositions of fine-grained self-compacting concretes based on recycled (secondary) crushed stone and sand, as well as on the basis of natural crushed stone and sand with a mineral additive from the fine fraction of recycled (secondary) sand

Тип бетона	Расход компонентов на 1 м ³ бетонной смеси ¹						Плотность смеси, кг/м ³
	цемент	щебень	песок	вода	минеральная добавка	химическая добавка	
Мелкозернистый самоуплотняющийся бетон на основе природных щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка	<u>400</u> 0,33	<u>900</u> 0,63	<u>760</u> 0,44	<u>202</u> 0,20	<u>180</u> 0,15	<u>7,54</u> 0,007	2226
Мелкозернистый самоуплотняющийся бетон на основе вторичных (рециклинговых) щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка	<u>400</u> 0,33	<u>810</u> 0,63	<u>614</u> 0,44	<u>230</u> 0,23	<u>50</u> 0,04	<u>6,32</u> 0,006	2051

Примечание: ¹В числителе приведены значения расхода компонентов мелкозернистого самоуплотняющегося бетона по массе, кг/м³, в знаменателе – по объему, м³/м³.

Таблица 2

Table 2

Сравнение реологических свойств мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных щебня и песка, а также на основе рециклинговых (вторичных) щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка
Comparison of the rheological properties of fine-grained self-compacting concretes based on natural crushed stone and sand, as well as on the basis of recycled (secondary) crushed stone and sand with a mineral additive from the fine fraction of secondary (recycled) sand

Тип бетона	Среднее значение распыла смеси, см/марка по удобоукладываемости	Раствороотделение, %/марка по удобоукладываемости	Марка бетонной смеси по вязкости	Текущность смеси/марка по текущести
Мелкозернистый самоуплотняющийся бетон на основе природных щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка	68/PK2	2,7 %/PK1	V2	2,38/T4
Мелкозернистый самоуплотняющийся бетон на основе вторичных (рециклинговых) щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка	69/PK2	3,4 %/PK1	V2	2,8/T4

традиционных и вторичных (рециклинговых) щебня и песка с применением в качестве минеральной добавки мелких фракций рециклингового песка приведено в табл. 3.

Анализ полученных результатов показал, что:

– прочность мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных щебня и песка с ми-

неральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка выше прочности мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе вторичных щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка на 30 %;

– плотность мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных щебня и песка с ми-



Рис. 1. Расплав мелкозернистой самоуплотняющейся бетонной смеси на основе природных щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка при определении ее удобоукладываемости

Fig. 1. Spread of a fine-grained self-compacting concrete mixture based on natural crushed stone and sand with a mineral additive of the fine fraction of secondary (recycling) sand when determining its workability



Рис. 2. Определение текучести мелкозернистой самоуплотняющейся бетонной смеси на основе природных щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка

Fig. 2. Determination of the fluidity of a fine-grained self-compacting concrete mixture based on natural crushed stone and sand with a mineral additive of the fine fraction of secondary (recycling) sand



Рис. 3. Расплав мелкозернистой самоуплотняющейся бетонной смеси на основе рециклинговых (вторичных) щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка при определении ее удобоукладываемости

Fig. 3. Spread of a fine-grained self-compacting concrete mixture based on recycled (recycled) crushed stone and sand with a mineral additive from the fine fraction of secondary (recycled) sand when determining its workability



Рис. 4. Определение текучести мелкозернистой самоуплотняющейся бетонной смеси на основе рециклинговых (вторичных) щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка

Fig. 4. Determination of the fluidity of a fine-grained self-compacting concrete mixture based on secondary (recycled) crushed stone and sand with a mineral additive of the fine fraction of secondary (recycled) sand

неральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка выше плотности мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе вторичных щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка на 9 %;

- марки по морозостойкости мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных

и рециклинговых (вторичных) щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка идентичны между собой и соответствуют F₂₀₀;

- марка по водонепроницаемости мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой

Таблица 3
Table 3

Сравнение основных физико-механических (прочности, плотности, морозостойкости, водонепроницаемости и истираемости) характеристик мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных и рециклинговых (вторичных) щебня и песка с применением в качестве минеральной добавки мелких фракций рециклингового песка
Comparison of the basic physical and mechanical (strength, density, frost resistance, water resistance and abrasion) characteristics of fine-grained self-compacting concrete based on natural and recycled (secondary) crushed stone and sand using fine fractions of recycled sand as a mineral additive

Тип бетона	Прочность на сжатие, МПа/ класс бетона	Плотность, кг/м³	Марка по морозостойкости	Марка по водонепроницаемости	Марка по истираемости
Мелкозернистый самоуплотняющийся бетон на основе природных щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка	37,1–40,1/B30	2216	F ₂₀₀	W16	G1
Мелкозернистый самоуплотняющийся бетон на основе рециклинговых (вторичных) щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка	27,3–30,6/B22,5	2035	F ₂₀₀	W10	G1

фракции рециклингового (вторичного) песка составляет W16. Марка по водонепроницаемости мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе рециклинговых (вторичных) щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции рециклингового (вторичного) песка составляет W10;

– марки по истираемости мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных и рециклинговых (вторичных) щебня и песка с ми-

неральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка идентичны между собой и соответствуют марке G1.

Общие виды образцов из мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных и рециклинговых щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка в процессе определения их основных физико-механических характеристик приведены на рис. 5–10.



Рис. 5. Общий вид образцов-кубов 100 × 100 × 100 мм для определения основных физико-механических характеристик мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка
Fig. 5. General view of cube samples 100 × 100 × 100 mm to determine the basic physical and mechanical characteristics of fine-grained self-compacting concrete based on natural crushed stone and sand with a mineral additive of the fine fraction of secondary (recycling) sand



Рис. 6. Общий вид образцов-кубов 100 × 100 × 100 мм для определения основных физико-механических характеристик мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе рециклинговых (вторичных) щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка
Fig. 6. General view of cube samples 100 × 100 × 100 mm to determine the basic physical and mechanical characteristics of fine-grained self-compacting concrete based on secondary (recycled) crushed stone and sand with a mineral additive of the fine fraction of secondary (recycled) sand



Рис. 7. Определение морозостойкости образцов из мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных и рециклинговых (вторичных) щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка

Fig. 7. Determination of frost resistance of samples made of fine-grained self-compacting concrete based on natural and secondary (recycled) crushed stone and sand with a mineral additive of the fine fraction of secondary (recycled) sand



Рис. 8. Общий вид образцов из мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных и рециклинговых (вторичных) щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка после их испытаний на морозостойкость

Fig. 8. General view of samples made of fine-grained self-seal concrete based on natural and secondary (recycled) crushed stone and sand with a mineral additive of the fine fraction of secondary (recycled) sand after testing them for frost resistance



Рис. 9. Общий вид образцов из мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных и рециклинговых (вторичных) щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка в процессе их испытаний на водонепроницаемость

Fig. 9. General view of samples made of fine-grained self-compacting concrete based on natural and secondary (recycled) crushed stone and sand with a mineral additive of the fine fraction of secondary (recycled) sand in the process of testing them for water resistance



Рис. 10. Общий вид образцов из мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных и рециклинговых (вторичных) щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка после их испытаний на водонепроницаемость

Fig. 10. General view of samples made of fine-grained self-compacting concrete based on natural and secondary (recycled) crushed stone and sand with a mineral additive of the fine fraction of secondary (recycled) sand after testing them for water resistance

Выводы

1. Реологические свойства (удобоукладываемость, расслаиваемость, вязкость и текучесть) экспериментально подобранных аналогичных по расходу цемента и заполнителей мелкозернистых самоуплотняющихся бетонных смесей на основе природных и рециклинго-

вых (вторичных) щебня и песка с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка практически идентичны и соответствуют требованиям ГОСТ Р 59714-2021 [18].

2. Прочность исследованных мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных за-

полнителей с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка составляет от 37,1 до 40,1 МПа и соответствует классу бетона В30. Прочность мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе рециклинговых заполнителей с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка составляет от 27,3 до 30,6 МПа и соответствует классу бетона В22,5.

3. Плотность мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных заполнителей с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка составляет 2216 кг/м³. Плотность мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе рециклинговых заполнителей с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка составляет 2035 кг/м³.

4. Морозостойкость мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных и рециклинговых заполнителей с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка соответствует марке F₁200.

5. Водонепроницаемость мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных заполнителей с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка соответствует марке W16. Водонепроницаемость мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе рециклинговых заполнителей с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка соответствует марке W10.

6. Истираемость мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных заполнителей с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка соответствует марке G1. Истираемость мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе рециклинговых заполнителей с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка соответствует марке G1.

7. Снижение прочности, плотности и марки по водонепроницаемости мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе рециклинговых заполнителей с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка по сравнению с аналогичными показателями мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природных заполнителей с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка обуславливается большим (на 7–9 %) водопоглощением рециклинговых щебня и песка по сравнению с природными заполнителями.

8. Мелкие фракции рециклингового песка с удельной поверхностью не ниже 230 м²/кг пригодны для применения в качестве минеральной добавки для производства самоуплотняющихся бетонов. Мелкие фракции вторичного (рециклингового) песка по дисперсности, по содержанию вредных примесей, по стойкости к химическому воздействию щелочей

цемента соответствуют требованиям ГОСТ Р 56592-2015 «Добавки минеральные для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия» [19]. Для определения механизма и степени проявления или отсутствия активности мелких фракций вторичного (рециклингового) песка необходимо проведение комплекса дополнительных исследований.

9. Исследованные мелкозернистые самоуплотняющиеся бетоны на основе традиционных и рециклинговых заполнителей с минеральной добавкой из мелкой фракции вторичного (рециклингового) песка (в соответствии с ГОСТ 25192-2012 «Бетоны. Классификация и общие технические требования» [20]) относятся к бетонам средней прочности (класс прочности при сжатии $B \leq B50$), к тяжелым бетонам (марки по средней плотности более D2000 до D2500), к бетонам средней морозостойкости (марки по морозостойкости более F50 до F300), к бетонам средней и высокой водонепроницаемости (марки по водонепроницаемости от W4 до W12 и более W12), к бетонам низкой истираемости (марка по истираемости G1).

10. Полученные в результате проведенных исследований результаты позволяют констатировать, что рециклинговые щебень и песок, а также мелкие фракции вторичного (рециклингового) песка (удельной поверхностью не ниже 230 м²/кг) могут применяться для производства самоуплотняющихся бетонов.

11. Для более широкого применения мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе рециклинговых заполнителей необходимо провести дальнейшие исследования с целью выявления характеристик долговечности таких бетонов. В связи с тем, что рециклинговый щебень в настоящее время начинает использоваться в различных областях строительной индустрии РФ, а рециклинговый (вторичный) песок с размерами зерен 1–5 мм в строительной индустрии страны практически не используется, весьма перспективными исследованиями являются разработки составов и изучение нормируемых эксплуатационных свойств мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов на основе природного щебня и рециклингового (вторичного) песка. Перспективными являются также исследования свойств мелких и ультрамелких фракций вторичного (рециклингового) песка (с размерами зерен менее 1 мм) для их широкого применения в качестве минеральной добавки не только для производства самоуплотняющихся бетонов, но и для производства традиционных бетонов, а также строительных растворов с уменьшением расхода цемента при их изготовлении.

12. При применении в самоуплотняющихся бетонах рециклинговых заполнителей их стоимость (с учетом перерасхода цемента, пластификаторов и воды) по сравнению с самоуплотняющимися бетонами на природных заполнителях ориентировочно будет снижаться на 25–30 %. Использование рециклинговых заполнителей для изготовления «новых» бетон-

ных, а также железобетонных конструкций и изделий соответствует стандартам «зеленого (экологического) строительства» по ресурсосбережению, бережливому производству и энергосбережению. Применение рециклинговых заполнителей при производстве бетонов уменьшает негативное воздействие на окружающую среду за счет безотходности производства и сокращения количества отвалов. Кроме того, повторное применение рециклинговых заполнителей позволит увеличить скорость и объемы строительства зданий и сооружений, что особенно актуально при восстановлении населенных пунктов после природных катастроф и вооруженных конфликтов, в том числе в новых регионах Российской Федерации.

Список литературы

- Okamura Hajime, Ouchi Masahiro Self-Compacting Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2003, vol. 1, no. 1, pp. 5–15.
- Self-Consolidating Concrete: Reported by ACI Committee 237 / American Concrete Institute. April 2007. [Farmington Hills]: ACI, 2007, 32 p.
- Коровкин М.О., Шестернин А.И., Ерошкина Н.А. Использование дробленого бетонного лома в качестве заполнителя для самоуплотняющегося бетона // *Инженерный вестник Дона*. 2015. № 3. С. 35.
- Файзрахманова И.И., Халиуллина М.И., Леклу А.Н., Амири О. Использование тонкодисперсных отсевов бетонного лома в цементных композициях для получения строительных растворов // *Известия КГАСУ*. 2016. № 4. С. 395–401.
- Наруть В.В., Ларсен О.А., Самченко С.В., Александрова О.В., Булгаков Б.И. Разработка составов самоуплотняющегося бетона на основе бетонного лома с использованием структурных характеристик // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2020. № 4. С. 8–16. DOI: <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-4-8-16>
- Павлов А.В., Коровяков В.Ф. Влияние добавки молотого бетонного лома на кинетику изменения прочности цементно-песчаного раствора // *Инженерный вестник Дона*. 2021. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2021/6879
- ГОСТ 8267-93. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия (с Изменениями № 1–4). Москва: Стандартинформ, 2018.
- ГОСТ 8736-2014. Песок для строительных работ. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2015.
- ГОСТ 24211-2008. Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия. Москва: Стандартинформ, 2010.
- ГОСТ 31108-2020. Цементы общестроительные. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2020.
- ГОСТ 23732-2011. Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2012.
- ГОСТ Р 59715-2022. Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Методы испытаний. Москва: Российский институт стандартизации, 2022.
- ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. Москва: Стандартинформ, 2018.
- ГОСТ 12730.1-2020. Бетоны. Методы определения плотности. Москва: Стандартинформ, 2021.
- ГОСТ 10060-2012. Бетоны. Методы определения морозостойкости. Москва: Стандартинформ, 2014.
- ГОСТ 12730.5-2018. Бетоны. Методы определения водонепроницаемости. Москва: Стандартинформ, 2019.
- ГОСТ 13087-2018. Бетоны. Методы определения истираемости. Москва: Стандартинформ, 2019.
- ГОСТ Р 59714-2021. Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Технические условия (EN 206:2013+A2:2021, NEQ). Москва: Стандартинформ, 2021.
- ГОСТ Р 56592-2015. Добавки минеральные для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия. Москва: Стандартинформ, 2015.
- ГОСТ 25192-2012. Бетоны. Классификация и общие технические требования. Москва: Стандартинформ, 2013.

References

- Okamura Hajime, Ouchi Masahiro Self-Compacting Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2003, vol. 1, no. 1, pp. 5–15.
- Self-Consolidating Concrete: Reported by ACI Committee 237 / American Concrete Institute. April 2007. [Farmington Hills]: ACI, 2007, 32 p.
- Korovkin M.O., Shesternin A.I., Eroshkina N.A. The use of crushed concrete scrap as filler for self-compacting concrete. *Engineering journal of Don*. 2015, no. 3, p. 35. (In Russian).
- Faizrakhmanov I.I., Khaliullin M.I., Leklou A.N., Amiri O. Use the fine screenings of concrete waste in a cement composition for producing mortar. *News KSUAE*. 2016, no. 4, pp. 395–401. (In Russian).
- Naruts V.V., Larsen O.A., Samchenko S.V., Aleksandrova O.V., Bulgakov B.I. Use of structural characteristics in self-compacting concrete mix design with recycled concrete aggregates. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2020, no. 4, pp. 8–16. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-4-8-16>
- Pavlov A.V., Korovyakov V.F. The influence of the addition of ground concrete scrap on the kinetics of changes in the strength of cement-sand mortar. *Engineering journal of Don*. 2021, no. 3. (In Russian). URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2021/6879

7. State Standard 8267-93. Crushed stone and gravel of solid rocks for construction works. Specifications (with Changes No. 1–4). Moscow: Standartinform Publ., 2018. (In Russian).
8. State Standard 8736-2014. Sand for construction works. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2015. (In Russian).
9. State Standard 24211-2008. Admixtures for concretes and mortars. General specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2010. (In Russian).
10. State Standard 31108-2020. Common cements. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2020. (In Russian).
11. State Standard 23732-2011. Water for concrete and mortars. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2012. (In Russian).
12. State Standard R 59715-2022. Self-compacting fresh concrete. Methods of testing. Moscow: Russian Institute of Standardization, 2022. (In Russian).
13. State Standard 10180-2012. Concretes. Methods for strength determination using reference specimens. Moscow: Standartinform Publ., 2018. (In Russian).
14. State Standard 12730.1-2020. Concretes. Methods of determination of density. Moscow: Standartinform Publ., 2021. (In Russian).
15. State Standard 10060-2012. Concretes. Methods for determination of frost-resistance. Moscow: Standartinform Publ., 2014. (In Russian).
16. State Standard 12730.5-2018. Concretes. Methods for determination of water tightness. Moscow: Standartinform Publ., 2019. (In Russian).
17. State Standard 13087-2018. Concretes. Methods of abrasion test. Moscow: Standartinform Publ., 2019. (In Russian).
18. State Standard R 59714-2021. Self-compacting concrete mixtures. Specifications (EN 206:2013+A2:2021, NEQ). Moscow: Standartinform Publ., 2021. (In Russian).
19. State Standard R 56592-2015. Mineral admixtures for concretes and mortars. General specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2015. (In Russian).
20. State Standard 25192-2012. Concretes. Classification and general technical requirements. Moscow: Standartinform Publ., 2013. (In Russian).

**Информация об авторах /
Information about the authors**

Замир Узаирович Беппаев✉, канд. техн. наук, заведующий лабораторией обследования и обеспечения долговечности бетонных и железобетонных конструкций (№ 9), НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: beton61@mail.ru

Zamir U. Beppaev✉, Cand. Sci. (Engineering), Head of Laboratory of Inspection and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures (No. 9), Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: beton61@mail.ru

Лидия Хореновна Аствацатурова, старший научный сотрудник лаборатории обследования и обеспечения долговечности бетонных и железобетонных конструкций (№ 9), НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Lydia H. Astvatsaturova, Senior Researcher of Laboratory of Inspection and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures (No. 9), Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

Сергей Алексеевич Колодяжный, научный сотрудник лаборатории обследования и обеспечения долговечности бетонных и железобетонных конструкций (№ 9), НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Sergei A. Kolodyazhny, Researcher of Laboratory of Inspection and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures (No. 9), Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

Сергей Анатольевич Вернигора, младший научный сотрудник лаборатории обследования и обеспечения долговечности бетонных и железобетонных конструкций (№ 9), НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Sergey A. Vernigora, Junior Researcher of Laboratory of Inspection and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures (No. 9), Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

Владислав Владимирович Лопатинский, инженер лаборатории обследования и обеспечения долговечности бетонных и железобетонных конструкций (№ 9), НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Vladislav V. Lopatinsky, Engineer of Laboratory of Inspection and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures (No. 9), Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author