

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

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ РЕЦИКЛИНГОВЫХ ПРОДУКТОВ ПЕРЕРАБОТКИ БЕТОНОВ В КАЧЕСТВЕ МИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ РАСТВОРОВ

Аннотация

Введение. Одним из важнейших резервов экономии материальных и энергетических ресурсов в области строительной индустрии является повторное вовлечение в сферу производства рециклинговых бетонных материалов (продуктов утилизации некондиционных бетонных, железобетонных конструкций и изделий), в частности, высокодисперсных порошков с перспективой их применения в качестве минеральной добавки для производства растворов общестроительного назначения. Реализация такого подхода практически позволит обеспечить внедрение важнейшего принципа безотходности технологических процессов (при производстве сборных и монолитных бетонных, железобетонных конструкций и изделий) и создать условия для решения важных экономических и экологических задач.

Целью работы было определение основных физико-механических характеристик, сравнительный анализ строительного раствора на портландцементе, а также растворов с замещением части портландцемента (на 10, 15 и 25 %) рециклинговым (бетонным) тонкодисперсным порошком с удельной поверхностью 4500 см²/г.

Материалы и методы. Для проведения исследований применялись: рециклинговый (бетонный) тонкодисперсный порошок с удельной поверхностью 4500 см²/г, строительный песок с модулем крупности $M_k = 2.31$ (по ГОСТ 8736-2014), портландцемент со шлаком ЦЕМII/B-Ш 42,5Н (по ГОСТ 31108-2020), химическая добавка «ЦЕНТРИПОР ТФМ 411Р» («CENTRIPOR TFM 411R»).

Подбор составов растворов проводили по СП 82-101-98. Испытания растворных смесей и растворов проводили по ГОСТ Р 58767-2019. Соответствие прочности растворов при сжатии марке определяли в соответствии с ГОСТ Р 58766-2019.

Результаты. В результате проведенных работ показано, что тонкодисперсный рециклинговый бетонный порошок с удельной поверхностью 4500 см²/г может применяться в качестве минеральной добавки (наполнителя) для производства строительных растворов наравне с используемыми в настоящее время в строительной индустрии страны добавками.

Выводы. Выявлена возможность применения тонкодисперсного рециклингового бетонного порошка с удельной поверхностью 4500 см²/г в качестве минеральной добавки (наполнителя) для производства строительных растворов наравне с используемыми в настоящее время в строительной отрасли страны добавками. Показано, что при замене 10 % цемента рециклинговым (вторичным) тонкодисперсным порошком с удельной поверхностью 4500 см²/г улучшается структура и увеличивается прочность строительных растворов марок М100–М150.

Ключевые слова: рециклинг, рециклинговый тонкодисперсный бетонный порошок, строительные растворы, безотходность технологического процесса, вторичное использование материалов

Для цитирования: Беппаев З.У., Аствацатурова Л.Х., Колодяжный С.А., Вернигора С.А., Лопатинский В.В. Перспективы применения тонкодисперсных рециклинговых продуктов переработки бетонов в качестве минеральных добавок для изготовления строительных растворов // *Бетон и железобетон*. 2023. № 1 (615). С. 43–55. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-1\(615\)-43-55](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-1(615)-43-55)

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. – выполнение экспериментальной части.

Лопатинский В.В. – выполнение экспериментальной части.

Финансирование

Исследование частично финансировалось ФАУ «ФЦС».

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 12.12.2022

Поступила после рецензирования 16.01.2023

Принята к публикации 26.01.2023

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

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

PROSPECTS FOR THE USE OF FINE-DISPERSED RECYCLING PRODUCTS OF CONCRETE PROCESSING AS MINERAL ADDITIVES FOR THE MANUFACTURE OF BUILDING MORTARS

Abstract

Introduction. One of the most important reserves for saving material and energy resources in the construction industry is the re-involvement of recycling concrete materials (products of disposal of substandard concrete, reinforced concrete structures and products), in particular, highly dispersed powders with the prospect of their use as a mineral additive for the production of mortars for general construction purposes, in the production field. The implementation of this approach will practically ensure the introduction of the most important principle of waste-free technological processes (in the production of prefabricated and monolithic concrete, reinforced concrete structures and products) and create conditions for solving important economic and environmental problems.

Aim. The aim of the work were the determining of the main physical and mechanical characteristics, comparative analysis of the mortar on Portland cement, as well as mortars with the replacement of a part of Portland cement (by 10, 15 and 25 %) with a recycling (concrete) fine powder with a specific surface area of 4500 cm²/g.

Materials and methods. For the research, the following components were used: recycling (concrete) fine powder with a specific surface area of 4500 cm²/g, construction sand with a size modulus $M_k = 2.31$ (according to GOST 8736-2014), portland cement with CEMII/V-W 42.5N (according to GOST 31108-2020) slag, chemical additive "CENTRIPOR TFM 411R".

The selection of mortar compositions was carried out according to SP 82-101-98. Tests of mortar mixtures and mortars were carried out according to GOST R 58767-2019. Compliance with the compressive strength of mortars with the grade was determined in accordance with GOST R 58766-2019.

Results. As a result of the work carried out, it is shown that fine-dispersed recycling concrete powder with a specific surface area of 4500 cm²/g can be used as a mineral additive (filler) for the production of mortars on a par with additives currently used in the construction industry of the country.

Conclusions. The possibility of using fine-dispersed recycling concrete powder with a specific surface area of 4500 cm²/g as a mineral additive (filler) for the production of mortars on a par with additives currently used in the construction industry of the country. It has been shown that when 10 % of cement is replaced with recycled (secondary) fine powder with a specific surface area of 4500 cm²/g, the strength of building mortars of the M100–M150 grades increases and its structure improves.

Keywords: recycling, recycling fine-dispersed concrete powder, building mortars, waste-free technological process, secondary use of materials

For citation: Beppaev Z.U., Astvatsaturova L.H., Kolodyazhny S.A., Vernigora S.A., Lopatinsky V.V. Prospects for the use of fine-dispersed recycling products of concrete processing as mineral additives for the manufacture of building mortars. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2023. No. 1 (615), pp. 43–55. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-1\(615\)-43-55](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-1(615)-43-55)

Author contribution statements

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

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

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

Vernigora S.A. – execution of the experimental part.

Lopatinsky V.V. – execution of the experimental part.

Funding

The study was partially funded by the FAO "FCS".

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Received 12.12.2022

Revised 16.01.2023

Accepted 26.01.2023

Введение

Одним из перспективных направлений экономии материальных и энергетических ресурсов при производстве бетонов и строительных растворов является использование рециркулируемых материалов – материалов, обладающих свойствами многократного использования. В частности, к таким материалам относятся некондиционные бетонные, железобетонные конструкции и изделия. Вторичная переработка (рециклинг) таких материалов представляет собой комплекс технологических мероприятий (дробление, рассев и т. п.) с получением готовых к применению бетонных щебня и песка.

Реализация принципов рециклинга практически позволит обеспечить внедрение важнейшего принципа безотходности технологических процессов (при производстве бетонных, железобетонных конструкций и изделий) и создать условия для решения актуальных экономических и экологических задач.

В ведущих развитых странах мира одобрена и успешно действует следующая приоритетность мероприятий в области переработки строительных отходов: снижение количества образования отходов, а также их вторичное использование и переработка. При этом в этих странах принята четкая иерархия методов обращения с отходами, при которой наиболее предпочтительным путем утилизации отходов является их рециклинг, т. е. процесс переработки и возвращения отходов в повторный оборот в качестве кондиционного товара [1, 2].

Использование рециклингового (вторичного) щебня в качестве заполнителя для производства бетонных и железобетонных конструкций и изделий разрешено Евростандартом EN 206-1 [3]. К рециркулированным заполнителям в EN 206-1 относят заполнители, извлеченные промывкой из неиспользованного (остаточного) незатвердевшего бетона. Их использование разрешено под ответственность производителя при соблюдении следующих условий: разделение заполнителя на фракции, соответствие породы извлеченных заполнителей породе заполнителя в основном объеме бетона, введение повторно используемых заполнителей в небольших количествах.

Для Российской Федерации использование вторичных ресурсов и внедрение системы рециклинга в производственный процесс является относительно новым и перспективным направлением. В настоящее время переработка вторичных ресурсов не выделена в обособленный объект государственного регулирования – Федеральный закон № 89-ФЗ от 24 июня 1998 года «Об отходах производства и потребления» с изменениями, внесенными Федеральным законом от 28 июля 2012 г. № 128-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» [4], не рассматривает отходы как вторичные материальные ресурсы. Платежи за разме-

щение отходов значительно ниже затрат, необходимых на совершенствование технологий. Необходимо повышение платежей за загрязнение окружающей среды и стоимости использования природных ресурсов, что позволит переориентировать предприятия на отказ от использования понятия «отходы» и внедрение в производство систем рециклинга. Следует отметить, что в Распоряжении Правительства Российской Федерации № 868-р от 10 мая 2016 г. «Стратегия развития промышленности строительных материалов на период до 2020 года и дальнейшую перспективу до 2030 года» [5] отмечается низкий уровень вовлечения отходов производства и потребления в новое производство (п. 8, стр. 19).

Использование вторичных ресурсов, а также масштабное освоение и внедрение системы рециклинга в производственный процесс Российской Федерации отвечает основным положениям Указа Президента Российской Федерации «Стратегия экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года» № 176 от 19 апреля 2017 г. [6].

Использование рециклинговых щебня и песка в качестве заполнителей для производства бетонных, железобетонных конструкций и изделий общестроительного назначения в настоящий момент в Российской Федерации не только актуально, но и частично подготовлено. В частности, возможность повторного использования рециклинговых щебня и песка в производстве бетонов предусмотрена в ГОСТ 25192-2012 «Бетоны. Классификация и общие технические требования» [7], в содержание которого введено понятие нового рециклированного вида бетона, изготавливаемого с применением утилизированных заполнителей и воды. Разработан ГОСТ 32495-2013 «Щебень, песок и песчано-щебеночные смеси из дробленого бетона и железобетона. Технические условия» [8], который регламентирует области применения щебня, песка и песчано-щебеночных смесей из дробленого бетона, в том числе в качестве заполнителей бетона и строительного раствора различного назначения. Этот стандарт также устанавливает технические характеристики, правила приемки, методы испытаний, требования к транспортированию и хранению названных материалов.

Кроме этого, использование вторичных ресурсов отвечает концепции бережливого производства, основной нормативной базой которой является ГОСТ Р 56020-2014 «Бережливое производство. Основные положения и словарь» [9].

В процессе рециклинга бетонных, железобетонных конструкций и изделий получают рециклинговый (бетонный) щебень и песок. Рециклинговый (бетонный) щебень состоит преимущественно из зерен первичного щебня и растворной части бетона, агрегированных в единый конгломерат. Рециклинговый (бетонный) песок состоит преимущественно из зерен растворной части бетона и зерен рециклингового

щебня менее 5 мм. Зерна менее 1,25 мм представляют собой тонкодисперсный порошок и состоят преимущественно из зерен растворной части бетона и негидратированных зерен цемента. Зерна мельче 1,25 мм, как правило, составляют 10–15 % от утилизируемой массы бетона.

В настоящее время в строительной отрасли Российской Федерации рециклинговые (бетонные) щебень и песок (фракций 1,25–5 мм) начали применять для производства низкопрочных (В15 и менее) бетонов. При этом фракции рециклингового песка менее 1,25 мм практически не используются и вывозятся в отвалы.

Одним из перспективных направлений применения рециклингового песка фракции менее 1,25 мм является его использование в качестве минеральных добавок (с замещением части цемента) при производстве строительных растворов. Их использование для замены тождественных природных материалов в растворах может принести значительные экономические, энергетические и экологические преимущества. Производство и транспортировка природных минеральных добавок являются причиной выбросов, представляющих 0,0046 млн т углеродного эквивалента за каждую тонну природных добавок по сравнению с 0,0024 млн т углеродного эквивалента за тонну рециклинговых добавок. С учетом мирового потребления природных добавок в год для производства бетонов и растворов их замена на рециклинговые добавки значительно сокращает выбросы в окружающую среду. Это преимущество будет более значимым с течением времени, поскольку истощение источников природных заполнителей инициирует их поставки на большие расстояния, в то время как источники рециклинговых добавок обычно расположены поблизости к производителям и потребителям бетона и раствора. Повторное использование отхо-

дов бетона во многих случаях весьма целесообразно и отвечает принципам концепции «устойчивого развития» («sustainable development»), основные положения которой предусматривают экономию материалов и энергии, повышение долговечности конструкций и уменьшение негативного воздействия на окружающую среду, в том числе сохранение невозобновимых источников природных ресурсов.

Цель

Целью работы было определение основных физико-механических характеристик и сравнительный анализ контрольного раствора на портландцементе, а также растворов с замещением части портландцемента (на 10, 15 и 25 %) рециклинговым тонкодисперсным порошком с удельной поверхностью 4500 см²/г.

Материалы и методы

Для определения основных физико-механических характеристик и проведения сравнительного анализа контрольного раствора на портландцементе, а также растворов с замещением части портландцемента (на 10, 15 и 25 %) рециклинговым (бетонным) тонкодисперсным порошком сотрудниками лаборатории № 9 НИИЖБ им. А.А. Гвоздева были проведены комплексные экспериментальные исследования. Для проведения работ из рециклингового (бетонного) песка фракций 1,25–5 мм были изготовлены пробы тонкодисперсного порошка с удельной поверхностью 4500 см²/г.

Для изготовления тонкодисперсного порошка использовали планетарную лабораторную мельницу BM6 Pro. Общий вид лабораторной мельницы BM6 Pro приведен на рис. 1.

Общий вид рециклингового тонкодисперсного бетонного порошка приведен на рис. 2.

Для изготовления экспериментальных образцов раствора применяли строительный песок с модулем



Рис. 1. Общий вид лабораторной мельницы BM6 Pro

Fig. 1. General view of the BM6 Pro laboratory mill



крупности $M_k = 2.31$ по ГОСТ 8736-2014 [10], портландцемент со шлаком ЦЕМII/В-Ш 42,5Н по ГОСТ 31108-2020 [11], химическую добавку «ЦЕНТРИПОР ТФМ 411Р» («CENTRIPOR TFM 411R»).

Подбор составов растворов проводили в соответствии с положениями СП 82-101-98 [12].

В ходе проведения экспериментальных работ определяли:

- реологические свойства растворяемых смесей;
- предел прочности на сжатие образцов раствора в возрасте 1, 7 и 28 сут;
- среднюю плотность образцов раствора в возрасте 1, 7 и 28 сут;
- водопоглощение образцов раствора в возрасте 1, 7 и 28 сут.

По полученным результатам проводили сравнительный анализ характеристик контрольного раствора с характеристиками растворов с рециклинговым порошком. Испытания растворяемых смесей и растворов проводили по ГОСТ Р 58767-2019 [13]. Соответствие прочности растворов при сжатии марке определяли в соответствии с ГОСТ Р 58766-2019 [14].

Испытания проводились в период с июня по сентябрь 2022 г. на испытательной базе НИИЖБ им. А.А. Гвоздева – структурного подразделения АО «НИЦ «Строительство».

Результаты

Составы контрольного раствора на портландце-

менте и растворов с замещением части портландцемента рециклинговым тонкодисперсным порошком с удельной поверхностью $4500 \text{ см}^2/\text{г}$ приведены в табл. 1 и 2.

Реологические свойства растворяемых смесей приведены в табл. 3.

Маркировки образцов растворов при проведении испытаний приведены в табл. 4.

Результаты определения предела прочности на сжатие образцов раствора приведены в табл. 5.

Результаты определения средней плотности образцов раствора приведены в табл. 6.

Результаты определения водопоглощения образцов раствора приведены в табл. 7.

Сравнительный анализ прочности контрольного раствора на сжатие к прочности растворов с рециклинговым порошком приведен в табл. 8.

Сравнительный анализ средней плотности контрольного раствора к средней плотности растворов с рециклинговым порошком приведен в табл. 9.

Сравнительный анализ водопоглощения контрольного раствора к водопоглощениям растворов с рециклинговым порошком приведен в табл. 10.

График набора прочности контрольного раствора и растворов с замещением 10, 15 и 25 % портландцемента на рециклинговым тонкодисперсным порошком с удельной поверхностью $4500 \text{ см}^2/\text{г}$ приведен на рис. 3.



Рис. 2. Общий вид рециклингового тонкодисперсного бетонного порошка

Fig. 2. General view of recycling fine concrete powder

Таблица 1
Table 1

Состав контрольного раствора на портландцементе
Composition of the control mortar on Portland cement

№	Компоненты растворяемой смеси	Расход компонентов на 1 м^3 растворяемой смеси, кг
1	Цемент	187,3
2	Рециклинговый тонкодисперсный порошок	–
3	Песок	1030,2
4	Химическая добавка «ЦЕНТРИПОР ТФМ 411Р»	0,38
5	Вода	174

Таблица 2
Table 2

Составы растворов с замещением части портландцемента рециклинговым тонкодисперсным порошком с удельной поверхностью 4500 см²/г
Compositions of mortar with replacement of a part of Portland cement by the recycling fine powder with a specific surface area of 4500 cm²/g

№	Компоненты растворной смеси	Расход компонентов на 1 м ³ растворной смеси, кг
Расход рециклингового тонкодисперсного порошка 10 %		
1	Цемент	168,6
2	Рециклинговый тонкодисперсный порошок	18,7
3	Песок	1030,2
4	Химическая добавка «ЦЕНТРИПОР ТФМ 411Р»	0,38
5	Вода	174
Расход рециклингового тонкодисперсного порошка 15 %		
1	Цемент	159,2
2	Рециклинговый тонкодисперсный порошок	28,1
3	Песок	1030,2
4	Химическая добавка «ЦЕНТРИПОР ТФМ 411Р»	0,38
5	Вода	174
Расход рециклингового тонкодисперсного порошка 25 %		
1	Цемент	140,5
2	Рециклинговый тонкодисперсный порошок	46,8
3	Песок	1030,2
4	Химическая добавка «ЦЕНТРИПОР ТФМ 411Р»	0,38
5	Вода	174

Таблица 3
Table 3

Реологические свойства растворных смесей
Rheological properties of mortar mixtures

№	Составы растворных смесей	Погружение конуса, см	Марка по подвижности раствора, Пк	Средняя плотность, кг/м ³
1	Контрольный раствор на портландцементе	8,5	Пк3	1978
2	Раствор с замещением 10 % портландцемента на рециклинговый тонкодисперсный порошок с удельной поверхностью 4500 см ² /г	9,0	Пк3	1987
3	Раствор с замещением 15 % портландцемента на рециклинговый тонкодисперсный порошок с удельной поверхностью 4500 см ² /г	9,5	Пк3	1990
4	Раствор с замещением 25 % портландцемента на рециклинговый тонкодисперсный порошок с удельной поверхностью 4500 см ² /г	9,0	Пк3	1990

Таблица 4
Table 4

Маркировка образцов растворов при проведении испытаний
Marking of mortar samples during testing

№	Составы растворов	Маркировка образцов		
		Возраст 1 сут	Возраст 7 сут	Возраст 28 сут
1	Контрольный раствор на портландцементе	K1	K7	K28

Продолжение таблицы 4

2	Раствор с замещением 10 % портландцемента на рециклинговый тонкодисперсный порошок с удельной поверхностью 4500 см ² /г	45/10-1	45/10-7	45/10-28
3	Раствор с замещением 15 % портландцемента на рециклинговый тонкодисперсный порошок с удельной поверхностью 4500 см ² /г	45/15-1	45/15-7	45/15-28
4	Раствор с замещением 25 % портландцемента на рециклинговый тонкодисперсный порошок с удельной поверхностью 4500 см ² /г	45/25-1	45/25-7	45/25-28

Таблица 5
Table 5

Результаты определения предела прочности на сжатие образцов раствора
Results of determination of the compressive strength of mortar samples

№	Состав раствора	Возраст раствора, сут	Маркировка образцов	Рабочая площадь сечения образца, см ²	Разрушающая нагрузка, Р, кН	Предел прочности на сжатие, R, кгс/см ²	Среднее значение прочности, R, кгс/см ²
1	Контрольный раствор на портландцементе	1	K1-1 K1-2 K1-3	49,98	12,0 12,0 11,5	24,0 24,0 23,0	23,7
2	Контрольный раствор на портландцементе	7	K7-1 K7-2 K7-3	49,98	43,8 42,2 43,6	87,6 84,4 87,2	86,4
3	Контрольный раствор на портландцементе	28	K28-1 K28-2 K28-3	49,98	62,1 62,0 67,1	124,3 124,1 134,3	127,6
4	Раствор с замещением 10 % портландцемента на рециклинговый порошок	1	45/10-1-1 45/10-1-2 45/10-1-3	49,98	13,2 14,7 13,1	26,4 29,4 26,2	27,3
5	Раствор с замещением 10 % портландцемента на рециклинговый порошок	7	45/10-7-1 45/10-7-2 45/10-7-3	49,98	38,5 39,4 40,4	77,0 78,8 80,8	78,9
6	Раствор с замещением 10 % портландцемента на рециклинговый порошок	28	45/10-28-1 45/10-28-2 45/10-28-3	49,98	64,6 63,9 69,4	129,3 127,9 138,9	132,0
7	Раствор с замещением 15 % портландцемента на рециклинговый порошок	1	45/15-1-1 45/15-1-2 45/15-1-3	49,98	13,1 13,0 13,9	26,2 26,0 27,8	26,7
8	Раствор с замещением 15 % портландцемента на рециклинговый порошок	7	45/15-7-1 45/15-7-2 45/15-7-3	49,98	38,6 38,2 41,7	77,2 76,4 83,4	79,0
9	Раствор с замещением 15 % портландцемента на рециклинговый порошок	28	45/15-28-1 45/15-28-2 45/15-28-3	49,98	50,3 59,4 63,9	100,6 118,9 127,9	115,8
10	Раствор с замещением 25 % портландцемента на рециклинговый порошок	1	45/25-1-1 45/25-1-2 45/25-1-3	49,98	9,3 9,5 8,5	18,6 19,0 17,0	18,2
11	Раствор с замещением 25 % портландцемента на рециклинговый порошок	7	45/25-7-1 45/25-7-2 45/25-7-3	49,98	27,2 28,6 31,8	54,4 57,2 63,6	58,4
12	Раствор с замещением 25 % портландцемента на рециклинговый порошок	28	45/25-28-1 45/25-28-2 45/25-28-3	49,98	49,7 53,1 48,5	99,4 106,2 97,0	100,9

Таблица 6
Table 6Результаты определения средней плотности образцов раствора
Results of determination of the average density of mortar samples

№	Состав раствора	Возраст раствора, сут	Маркировка образцов	Объем образца, V, см ³	Масса образца, m, г	Плотность образца P, кг/м ³	Среднее значение плотности, P, кг/м ³
1	Контрольный раствор на портландцементе	1	K1-1 K1-2 K1-3	353,4	710 710 706	2009 2009 1998	2005
2	Контрольный раствор на портландцементе	7	K7-1 K7-2 K7-3	353,4	700 711 701	1980 2012 1984	1992
3	Контрольный раствор на портландцементе	28	K28-1 K28-2 K28-3	353,4	687 687 685	1944 1944 1938	1942
4	Раствор с замещением 10 % портландцемента на рециклинговый порошок	1	45/10-1-1 45/10-1-2 45/10-1-3	353,4	713 700 703	2018 1981 1989	1996
5	Раствор с замещением 10 % портландцемента на рециклинговый порошок	7	45/10-7-1 45/10-7-2 45/10-7-3	353,4	683 692 698	1933 1958 1975	1955
6	Раствор с замещением 10 % портландцемента на рециклинговый порошок	28	45/10-28-1 45/10-28-2 45/10-28-3	353,4	670 668 684	1896 1890 1935	1907
7	Раствор с замещением 15 % портландцемента на рециклинговый порошок	1	45/15-1-1 45/15-1-2 45/15-1-3	353,4	707 721 720	2001 2040 2037	2026
8	Раствор с замещением 15 % портландцемента на рециклинговый порошок	7	45/15-7-1 45/15-7-2 45/15-7-3	353,4	686 699 688	1941 1978 1947	1955
9	Раствор с замещением 15 % портландцемента на рециклинговый порошок	28	45/15-28-1 45/15-28-2 45/15-28-3	353,4	680 684 681	1924 1935 1927	1929
10	Раствор с замещением 25 % портландцемента на рециклинговый порошок	1	45/25-1-1 45/25-1-2 45/25-1-3	353,4	714 726 710	2020 2054 2009	2028
11	Раствор с замещением 25 % портландцемента на рециклинговый порошок	7	45/25-7-1 45/25-7-2 45/25-7-3	353,4	703 698 707	1989 1975 2001	1988
12	Раствор с замещением 25 % портландцемента на рециклинговый порошок	28	45/25-28-1 45/25-28-2 45/25-28-3	353,4	674 681 691	1907 1927 1955	1930

Таблица 7
Table 7Результаты определения водопоглощения образцов раствора
Results of determination of water absorption of mortar samples

№	Состав раствора	Возраст раствора, сут	Маркировка образцов	Масса водонасыщенного образца, m_n , г	Масса высушенного образца, m_c , г	Водопоглощение отдельного образца по массе, W_o , %	Среднее значение водопоглощения серии образцов W_{cp} , %
1	Контрольный раствор на портландцементе	1	K1-1 K1-2 K1-3	714 699 713	636 621 635	12,3 12,6 12,3	12,4
2	Контрольный раствор на портландцементе	7	K7-1 K7-2 K7-3	718 714 719	645 639 644	11,3 11,7 11,6	11,6
3	Контрольный раствор на портландцементе	28	K28-1 K28-2 K28-3	717 717 717	642 642 641	11,7 11,7 11,9	11,7
4	Раствор с замещением 10 % портландцемента на рециклинговый порошок	1	45/10-1-1 45/10-1-2 45/10-1-3	703 714 706	627 635 630	12,1 12,4 12,1	12,2
5	Раствор с замещением 10 % портландцемента на рециклинговый порошок	7	45/10-7-1 45/10-7-2 45/10-7-3	718 723 711	640 647 637	12,2 11,7 11,6	11,9
6	Раствор с замещением 10 % портландцемента на рециклинговый порошок	28	45/10-28-1 45/10-28-2 45/10-28-3	705 701 720	633 630 650	11,4 11,3 10,8	11,1
7	Раствор с замещением 15 % портландцемента на рециклинговый порошок	1	45/15-1-1 45/15-1-2 45/15-1-3	720 732 737	642 654 657	12,1 11,9 12,2	12,1
8	Раствор с замещением 15 % портландцемента на рециклинговый порошок	7	45/15-7-1 45/15-7-2 45/15-7-3	713 733 718	640 660 643	11,4 11,1 11,7	11,4
9	Раствор с замещением 15 % портландцемента на рециклинговый порошок	28	45/15-28-1 45/15-28-2 45/15-28-3	717 722 718	645 650 650	11,2 11,1 10,5	10,9
10	Раствор с замещением 25 % портландцемента на рециклинговый порошок	1	45/25-1-1 45/25-1-2 45/25-1-3	723 717 723	643 637 640	12,4 12,6 13,0	12,7
11	Раствор с замещением 25 % портландцемента на рециклинговый порошок	7	45/25-7-1 45/25-7-2 45/25-7-3	721 720 718	644 642 642	12,0 12,1 11,8	12,0
12	Раствор с замещением 25 % портландцемента на рециклинговый порошок	28	45/25-28-1 45/25-28-2 45/25-28-3	713 722 731	642 650 660	11,1 11,1 10,8	11,0

Таблица 8
Table 8

Сравнительный анализ прочности контрольного раствора на сжатие к прочности растворов с рециклинговым тонкодисперсным порошком
Comparative analysis of the compressive strength of the control mortar to the strength of mortars with recycled fine powder

№	Состав раствора	Маркировка образцов	Среднее значение прочности серии образцов раствора на сжатие в сутках и % прочности растворов с рециклинговым тонкодисперсным порошком к прочности контрольного раствора, R, кгс/см ²					
			1	%	7	%	28	%
1	Контрольный раствор на портландцементе	K1 K7 K28	23,7	100	86,4	100	127,6	100
2	Раствор с замещением 10 % портландцемента на рециклинговый порошок	45/10-1 45/10-7 45/10-28	27,3	115	78,9	91,3	132,0	103
3	Раствор с замещением 15 % портландцемента на рециклинговый порошок	45/15-1 45/15-7 45/15-28	26,7	113	79,0	91,4	115,8	90,7
4	Раствор с замещением 25 % портландцемента на рециклинговый порошок	45/25-1 45/25-7 45/25-28	18,2	76,8	58,4	67,6	100,9	79,1

Таблица 9
Table 9

Сравнительный анализ средней плотности контрольного раствора к средней плотности растворов с рециклинговым тонкодисперсным порошком
Comparative analysis of the average density of the control mortar to the average density of mortars with recycled fine powder

№	Состав раствора	Маркировка образцов	Значение средней плотности образцов раствора в сутках и % средней плотности растворов с рециклинговым тонкодисперсным порошком к средней плотности контрольного раствора, P, кг/м ³					
			1	%	7	%	28	%
1	Контрольный раствор на портландцементе	K1 K7 K28	2005	100	1992	100	1942	100
2	Раствор с замещением 10 % портландцемента на рециклинговый порошок	45/10-1 45/10-7 45/10-28	1996	99,6	1955	98,1	1907	98,2
3	Раствор с замещением 15 % портландцемента на рециклинговый порошок	45/15-1 45/15-7 45/15-28	2026	101	1955	98,1	1929	99,3
4	Раствор с замещением 25 % портландцемента на рециклинговый порошок	45/25-1 45/25-7 45/25-28	2028	101	1988	99,8	1930	99,4

Таблица 10
Table 10

Сравнительный анализ водопоглощения контрольного раствора к водопоглощениям растворов с рециклинговым тонкодисперсным порошком
Comparative analysis of the water absorption of the control mortar to the water absorption of mortars with recycled fine powder

№	Состав раствора	Маркировка образцов	Водопоглощение образцов раствора в сутках и % водопоглощения растворов с рециклинговым тонкодисперсным порошком к водопоглощению контрольного раствора, W, %					
			1	%	7	%	28	%
1	Контрольный раствор на портландцементе	K1 K7 K28	12,4	100	11,6	100	11,7	100
2	Раствор с замещением 10 % портландцемента на рециклинговый порошок	45/10-1 45/10-7 45/10-28	12,2	98,4	11,9	103	11,1	94,9
3	Раствор с замещением 15 % портландцемента на рециклинговый порошок	45/15-1 45/15-7 45/15-28	12,1	97,6	11,4	98,3	10,9	93,2
4	Раствор с замещением 25 % портландцемента на рециклинговый порошок	45/25-1 45/25-7 45/25-28	12,7	102	12,0	103	11,0	94,0

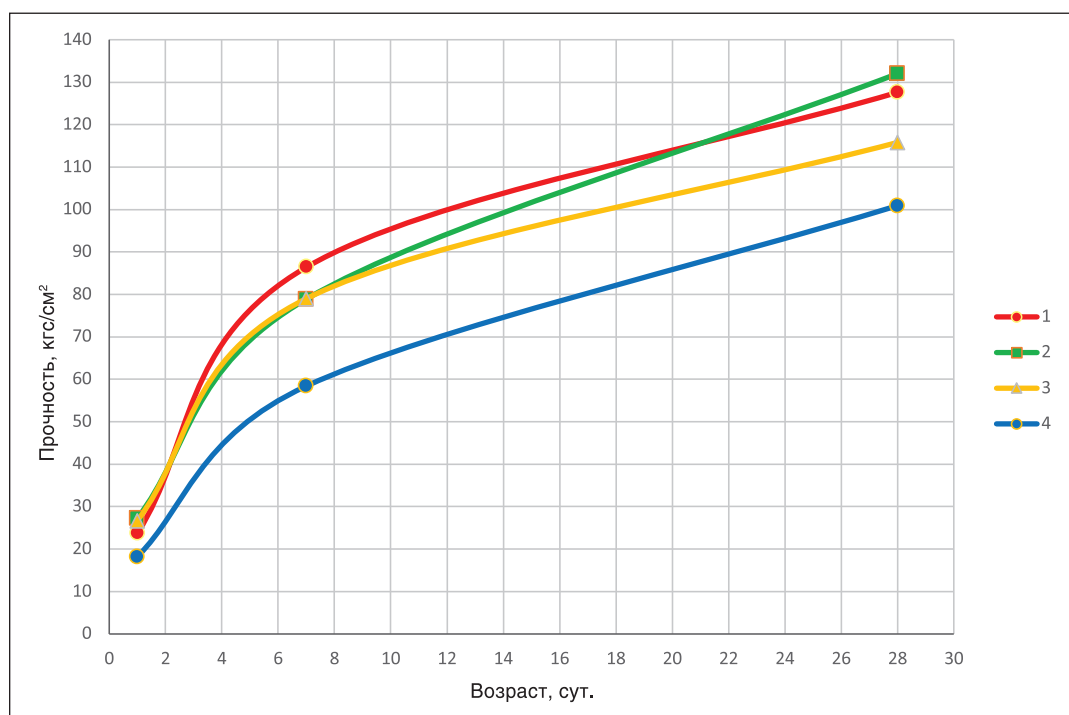


Рис. 3. График набора прочности контрольного раствора и растворов с замещением 10, 15 и 25 % портландцемента на рециклинговый тонкодисперсный порошок с удельной поверхностью 4500 см²/г: 1 – контрольный раствор; 2 – раствор с замещением 10 % портландцемента на рециклинговый тонкодисперсный порошок; 3 – раствор с замещением 15 % портландцемента на рециклинговый тонкодисперсный порошок; 4 – раствор с замещением 25 % портландцемента на рециклинговый тонкодисперсный порошок

Fig. 3. Graph of strength gain of the control mortar and mortars with the substitution of 10, 15 and 25 % Portland cement for recycled fine powder with a specific surface area of 4500 cm²/g: 1 – control mortar; 2 – mortar with the substitution of 10 % Portland cement for recycled fine powder; 3 – mortar with replacement of 15 % Portland cement with recycled fine powder; 4 – mortar with replacement of 25 % portland cement with recycled fine powder

Выводы

1. Прочность раствора с замещением части портландцемента на 10 % рециклинговым (вторичным) тонкодисперсным порошком с удельной поверхностью $4500 \text{ см}^2/\text{г}$ в возрасте 1 суток составляет 115 % от прочности контрольного раствора на портландцементе, в возрасте 7 суток – 91,3 %, в возрасте 28 суток – 103 % от прочности контрольного раствора на портландцементе.

2. Плотности этих растворов для всех возрастов практически идентичны плотности контрольных растворов и составляют 98,1–99,6 % от плотности контрольных растворов.

3. Водопоглощение этих растворов для 1 суток составляет 98,4 % от водопоглощения контрольных образцов, для 7 суток – 103 %, для 28 суток – 94,9 %.

4. Анализ полученных результатов проведенных экспериментальных исследований показывает, что тонкодисперсный рециклинговый бетонный порошок с удельной поверхностью $4500 \text{ см}^2/\text{г}$ может применяться в качестве минеральной добавки (наполнителя) для производства строительных растворов наравне с используемыми в настоящее время в строительной индустрии страны добавками. При замене 10 % цемента рециклинговым (вторичным) тонкодисперсным порошком с удельной поверхностью $4500 \text{ см}^2/\text{г}$ прочность строительных растворов марок М100–М150 не снижается. Плотность и пористость строительных растворов с замещением 10 % цемента рециклинговым (вторичным) тонкодисперсным порошком с удельной поверхностью $4500 \text{ см}^2/\text{г}$ тождественна аналогичным показателям контрольных растворов.

5. В настоящее время в Российской Федерации документы, нормирующие требования к рециклинговым бетонным материалам, практически отсутствуют. Для широкого применения в строительной отрасли рециклинговых бетонных материалов необходимо проведение комплекса экспериментальных работ с разработкой нового ГОСТа, что позволит усовершенствовать процессы утилизации бетонных, железобетонных конструкций и изделий с завершенным сроком эксплуатации для получения качественного и готового к применению строительного материала. Энергетические затраты на производство рециклинговых (вторичных) бетонных материалов в разы меньше, чем затраты на природные материалы. Небольшая цена и простота получения создают широкую сферу для применения рециклинговых (вторичных) бетонных материалов. Помимо этого, их применение существенно снижает техногенную нагрузку на природную среду, а его нейтральность при использовании не загрязняет окружающую среду.

6. Использование рециклинговых бетонных материалов (тонкодисперсных порошков, щебня и песка) приобретает особую актуальность в связи с необходимостью восстановления разрушенных зданий и

сооружений в новых субъектах Российской Федерации и осуществлении реновации жилищного фонда в городе Москве. Одним из наиболее рациональных путей утилизации образующихся при этом отходов с экологической и экономической точки зрения является их рециклирование с получением вторичных материалов (щебня, песка и тонкодисперсных порошков) и с последующим применением их в качестве заполнителей и минеральных добавок (наполнителей) для производства бетонов, а также растворов общестроительного назначения.

Список литературы

1. Kikuchi M. Application of Recycled Concrete for Structural Concrete. Experimental Study on the Quality of Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete / M. Kikuchi, Y. Dosho, M. Narikawa, Y. Ohshima, A. Koyama, T. Miura. Proceeding of Fourth CAKMET / ACUCI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology, Tokushima. Japan, 1998, pp. 1073–1101.
2. Donavan Christine T. Recycling of construction waste. The new solutions of old problems / Ch. T. Donovan. Resour. Recycl. 1991, no. 8, pp. 146–155.
3. EN 206-1 «БЕТОН. Часть 1: Общие технические требования, Производство и контроль качества».
4. Федеральный закон № 89-ФЗ от 24 июня 1998 года «Об отходах производства и потребления» с изменениями, внесенными Федеральным законом от 28 июля 2012 г. № 128-ФЗ.
5. Распоряжение Правительства Российской Федерации № 868-р от 10 мая 2016 г. «Стратегия развития промышленности строительных материалов на период до 2020 года и дальнейшую перспективу до 2030 года».
6. Указ Президента Российской Федерации № 176 от 19 апреля 2017 г. «Стратегия экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года».
7. ГОСТ 25192-2012. Бетоны. Классификация и общие технические требования. 2013.
8. ГОСТ 32495-2013. Щебень, песок и песчано-щебеночные смеси из дробленого бетона и железобетона. Технические условия. 2015.
9. ГОСТ Р 56020-2014. Бережливое производство. Основные положения и словарь. 2015.
10. ГОСТ 8736-2014. Песок для строительных работ. Технические условия. 2015.
11. ГОСТ 31108-2020. Цементы общестроительные. Технические условия. 2021.
12. СП 82-101-98. Приготовление и применение растворов строительных. 1998.
13. ГОСТ Р 58767-2019. Растворы строительные. Методы испытаний по контрольным образцам. 2022.
14. ГОСТ Р 58766-2019. Растворы строительные. Общие технические условия. 2022.

References

1. Kikuchi M. Application of Recycled Concrete for Structural Concrete. Experimental Study on the Quality of Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete / M. Kikuchi, Y. Dosho, M. Narikawa, Y. Ohshima, A. Koyama, T. Miura. Proceeding of Fourth CAKMET / ACUCI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology, Tokushima. Japan, 1998, pp. 1073–1101.
2. Donavan Christine T. Recycling of construction waste. The new solutions of old problems / Ch. T. Donovan. Resour. Recycl. 1991, no. 8, pp. 146–155.
3. EN 206-1 "CONCRETE. Part 1: Specification, performance, production and conformity".
4. Federal Law No. 89-FZ of June 24, 1998 "On Production and Consumption Waste" as amended by Federal Law No. 128-FZ of July 28, 2012 (in Russian).
5. Decree of the Government of the Russian Federation No. 868-r dated May 10, 2016, "Strategy for the development of the construction materials industry for the period up to 2020 and further prospects up to 2030" (in Russian).
6. Decree of the President of the Russian Federation No. 176 dated April 19, 2017 "Strategy of environmental safety of the Russian Federation for the period up to 2025" (in Russian).
7. State Standard 25192-2012. Concretes. Classification and general technical requirements. 2013 (in Russian).
8. State Standard 32495-2013. Aggregates, fines and its mixtures made from recycled reinforced and non-reinforced concrete. Specifications. 2015 (in Russian).
9. State Standard R 56020-2014. Lean production. Fundamentals and vocabulary. 2015 (in Russian).
10. State Standard 8736-2014. Sand for construction works. Specifications. 2015 (in Russian).
11. State Standard 31108-2020 Common cements. Specifications. 2021 (in Russian).
12. SP 82-101-98. Manufacturing and usage of solutions in construction industry. 1998 (in Russian).
13. State Standard R 58767-2019. Mortars. Test methods using reference specimens. 2022 (in Russian).
14. State Standard R 58766-2019. Mortars. General specifications. 2022 (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. Bepbaev✉, Cand. Sci. (Engineering), Head of Laboratory of inspection and durability of concrete and reinforced concrete structures No. 9, NIIZHB 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, NIIZHB 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, NIIZHB 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, NIIZHB 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, NIIZHB named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author