

УДК 691.32+624.172

**Экспериментальное исследование физико-механических и
микроструктурных свойств бетона на основе резинового порошка,
полученного из отработанных автомобильных шин и модифицированного
химической добавкой**

Хасанов Собир Садыкович

канд. техн. наук

доц., Ташкентский университет архитектуры и строительства

Республика Узбекистан, г. Ташкент

Шакиров Икрам Исламович

докторант

кафедры, Технология строительных материалов и конструкций, Ташкентский

архитектурно-строительный университет

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: ikrom.shakirov404@gmail.com

Соттикулов Элёр Сотимбоевич

д-р техн. наук

вед. научн. сотр. ООО Ташкентский научно-исследовательский институт химической

технологии

Республика Узбекистан, п/о Ибрат

**Experimental investigation of the physicomachanical and microstructural
properties of concrete incorporating rubber powder derived from end-of-life
tires and modified with a chemical admixture**

Khasanov Sobir

candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Tashkent University of Architecture and Civil Engineering

Republic of Uzbekistan, Tashkent

Shakirov Ikram

PhD, researcher

of the Department of Construction Materials and Structural Engineering Technology Tashkent

University of Architecture and Civil Engineering

Republic of Uzbekistan, Tashkent

Sottikulov Elyor

doctor of Technical Sciences, Leading Researcher

LLC Tashkent Research Institute of Chemical Technology

Republic of Uzbekistan, Ibrot p.o

Библиографическое описание: Хасанов С.С., Шакиров И.И., Соттикулов Э.С. Экспериментальное исследование физико-механических и микроструктурных свойств бетона на основе резинового порошка, полученного из отработанных автомобильных шин и модифицированного химической добавкой // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23274>

Аннотация

В настоящее время увеличение объёма отработанных автомобильных шин делает их экологически безопасную переработку и эффективное использование при производстве строительных материалов одним из наиболее актуальных направлений научных исследований. В настоящем исследовании резиновый порошок, полученный из отработанных автомобильных шин, использовался в качестве материала для замещения 20 % объёма природного мелкого заполнителя песка в составе бетона, а физико-механические и микроструктурные свойства бетона изучались экспериментально. В ходе исследования с использованием оптической микроскопии была проанализирована морфология поверхности частиц резинового порошка фракции 0,6–1,5 мм. Подготовленные бетонные образцы сравнивались с контрольным составом, а их прочность при сжатии определялась через 3, 7 и 28 суток твердения. Кроме того, для улучшения сцепления между резиновым порошком и цементным камнем поверхность частиц предварительно обрабатывали латексная добавка Sika Latex, после чего анализировали её влияние на механические свойства бетона. Результаты исследования показали, что применение резинового порошка снижает прочность бетона при сжатии. Микроструктурный анализ подтвердил, что качество сцепления между резиновым порошком и цементным камнем является одним из основных факторов, определяющих механические свойства бетона.

Abstract

At present, the increasing volume of end-of-life automobile tires has made their environmentally safe recycling and effective utilization in the production of construction materials one of the most important areas of scientific research. In this study, rubber powder obtained from end-of-life automobile tires was used as a material to replace 20 % by volume of the natural fine aggregate sand in concrete, and the physico-mechanical and microstructural properties of the concrete were investigated experimentally. During the study, the surface morphology of rubber powder particles with a particle size of 0.6–1.5 mm was analyzed using optical microscopy. The prepared concrete specimens were compared with the control mixture, and their compressive strength was determined after 3, 7, and 28 days of curing. In addition, to improve the bond between the rubber powder and the cement matrix, the surface of the rubber particles was pre-treated with the chemical admixture Sika Latex, after which its effect on the mechanical properties of the concrete was analyzed. The results showed that the incorporation of rubber powder reduced the compressive strength of the concrete. Microstructural analysis confirmed that the quality of the bond between the rubber powder and the cement matrix is one of the main factors determining the mechanical properties of concrete.

Ключевые слова: резиновый порошок, отработанные автомобильные шины, прочность при сжатии, утилизация, микроструктура, природный мелкий заполнитель, бетон, химическая добавка.

Keywords: rubber powder, waste tires, compressive strength, recycling, microstructure, natural fine aggregate, concrete, chemical admixture.

Введение

В настоящее время природные ресурсы добываются, перерабатываются, используются в качестве готовой продукции, а по окончании срока службы выбрасываются. В результате это приводит к сокращению природных ресурсов, увеличению объема отходов и усилению негативного воздействия на окружающую среду [9]. В качестве примера можно привести отходы, образующиеся из автомобильных шин.

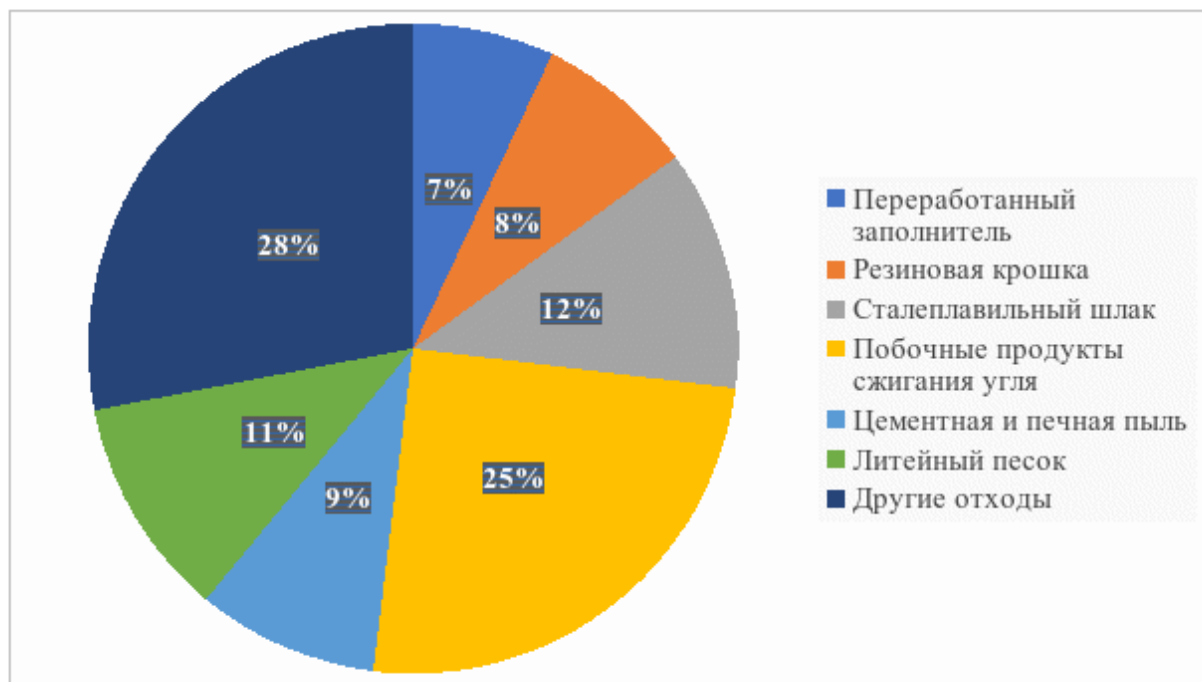


Рисунок 1. Показатели использования различных видов отходов

В настоящее время в мире ежегодно производится примерно 1,5 миллиарда автомобильных шин. В результате этого ежегодно образуется 1 миллиард отработанных автомобильных шин. Автомобильные шины являются биологически неразлагаемым материалом, и в процессе их сжигания или разложения выделяются токсичные соединения, такие как диоксины, мышьяк, кадмий и бензол, загрязняющие атмосферу, почву и водные ресурсы [12].

Во многих исследованиях подробно изучено влияние различных форм и размеров резиновых материалов, включая резиновый порошок и резиновую крошку, на свойства материалов. Так, в исследовании Н. Liu и соавт. [7] было установлено, что при обработке резинового порошка смолой прочность на сжатие увеличилась на 12 %, а прочность на растяжение — на 40 %. J. Lafta и соавт. [6] исследовали бетон с заменой песка 5–15 % резинового порошка, а также влияние 2,5–5 % микрокремнезема. В результате было установлено, что введение микрокремнезема улучшает плотность и водостойкость. Y.C. Khern и соавт. [3] изучали улучшение механических свойств бетона в результате химической обработки 8 % резинового порошка растворами NaOH и $\text{Ca}(\text{ClO})_2$. При химической обработке прочность практически достигала уровня контрольного бетона. В других исследованиях были предложены различные способы предварительной обработки

резины с использованием таких химических добавок, как перманганат калия (KMnO_4) и гидросульфит натрия (NaHSO_3) [13], (H_2SO_4 , HCl , HNO_3 и CH_3COOH), хлорид кальция (CaCl_2) и перекись водорода (H_2O_2) [1]. Многочисленные исследования показывают, что влияние применения измельченной резины автомобильных шин в качестве заполнителя для бетона на его механические, физические и эксплуатационные свойства до настоящего времени изучено недостаточно. В особенности влияние этих материалов на свойства бетона, оптимальная степень замещения, а также оптимальный способ предварительной обработки поверхности резиновой крошки до сих пор исследованы недостаточно.

Целью настоящего исследования является экспериментальное изучение применения измельченной резины автомобильных шин в составе бетона в качестве материала для частичной замены природных заполнителей, а также ее влияния на физико-механические свойства бетона.

Материалы и методы

Цемент: В настоящем научном исследовании был выбран портландцемент типа ЦЕМ I 42,5 Н произведенный АО «Бекабад цемент» Ташкентской области.

Таблица 1.

Физико-механические свойства портландцемента

Нормальная густота, %	Сроки схватывания, мин		Истинная плотность, г/см ³	Насыпная плотность, кг/м ³	Насыпная плотность в уплотненном состоянии, кг/ м ³	Остаток на сите, %	ПСХ
	начало	окончание					
27	165	285	3.124	1170	1570	8	3296

Таблица 2.

Химический состав портландцемента

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO(свободный)
64.58	21.54	4.63	4.62	1.68	0.63

Таблица 3.

Минералогический состав портландцемента

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
61.54	15.32	4.43	14.04

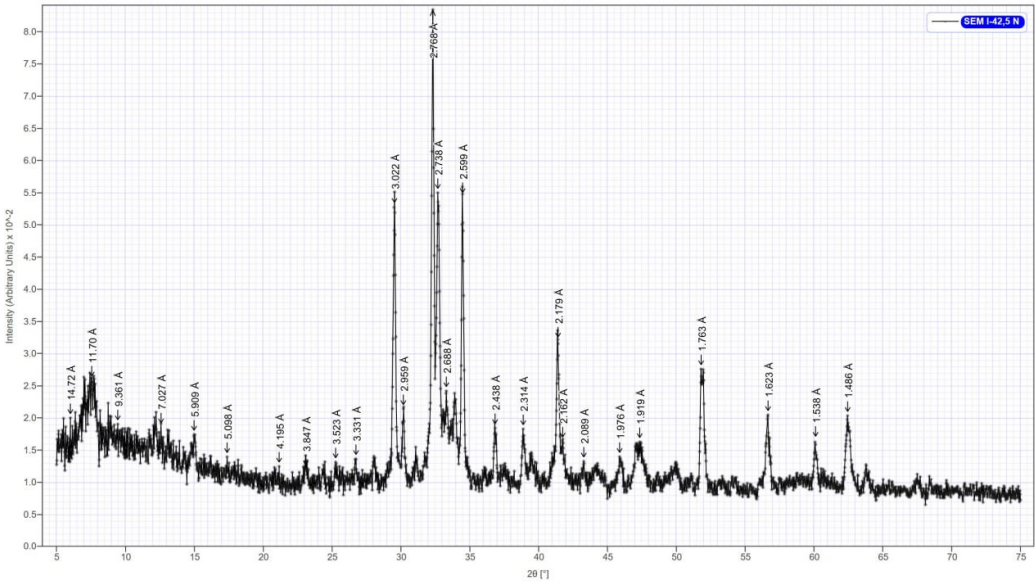


Рисунок 2. Дифрактограмма рентгеновской дифракции (XRD) цемента

Крупный заполнитель: В настоящем исследовании использовался щебень фракции 5–20 мм, полученный в Чиназском районе Ташкентской области.

Таблица 4.

Основные физико-механические свойства щебня, используемого в качестве крупного заполнителя для бетона

№	Показатели	Единица измерения	Крупный заполнитель (щебень)
1	Истинная плотность	кг/см ³	2600
2	Насыпная плотность	кг/см ³	1400
3	Модуль крупности	мм	5-10
4	Пустотность	%	46.2

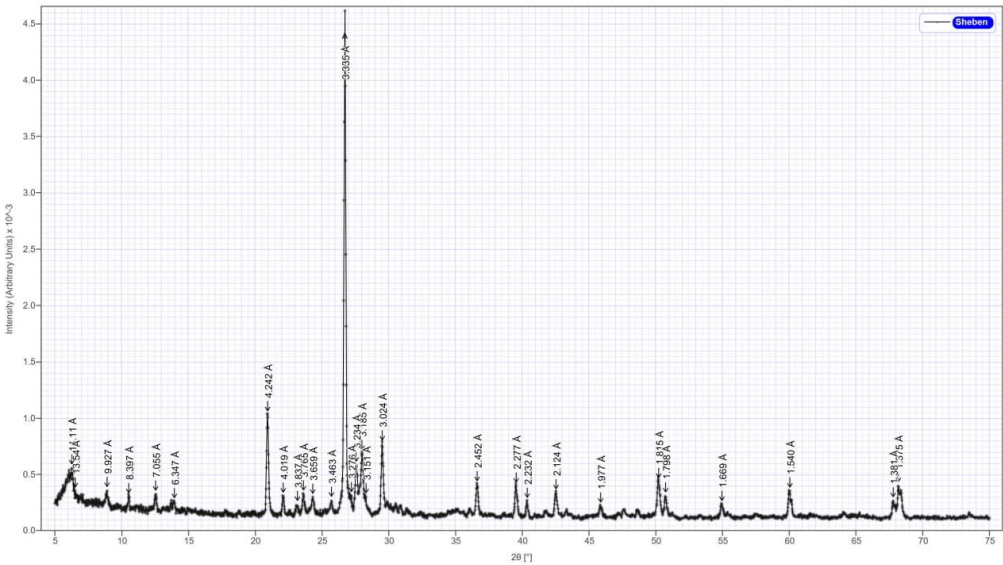


Рисунок 3. Дифрактограмма рентгеновской дифракции (XRD) образца щебня

Мелкий заполнитель: В настоящем исследовании в качестве мелкого заполнителя использовался природный песок, полученный в Чиназском районе Ташкентской области.

Таблица 5.

Основные физико-механические свойства мелкого заполнителя

№	Показатели	Единица измерения	Значение показателей
1	Модуль крупности	-	2.25
3	Истинная плотность	кг/см ³	2610
4	Насыпная плотность	кг/см ³	1360
5	Пустотность	%	47
6	Содержание пылевидных и глинистых частиц	%	1

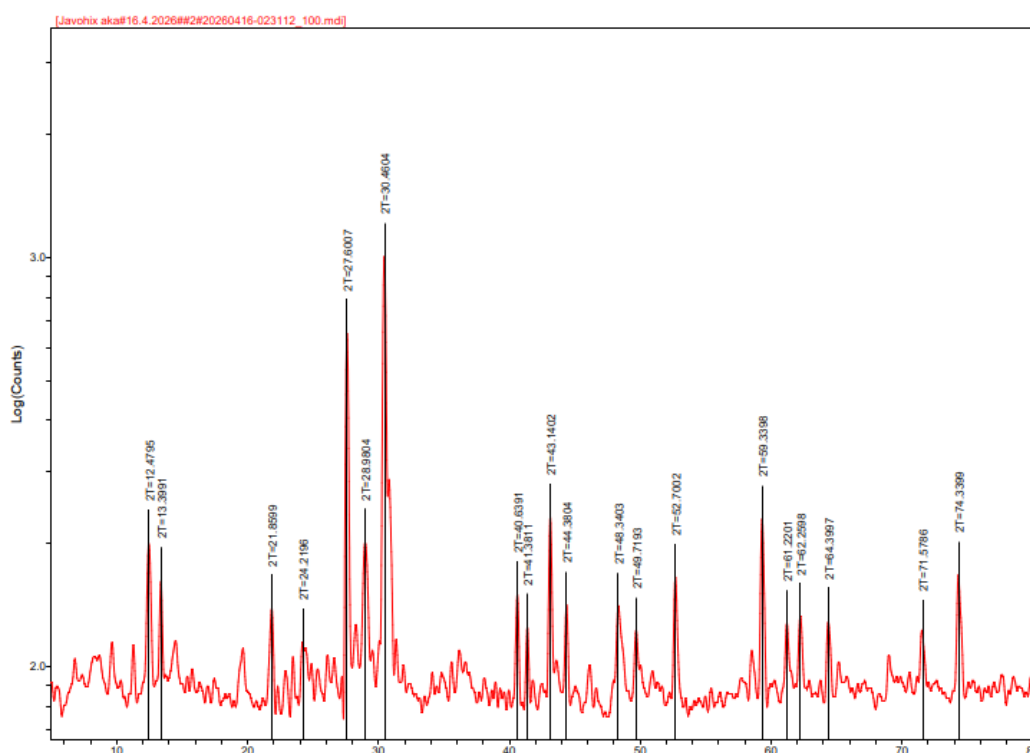


Рисунок 4. Дифрактограмма рентгеновской дифракции (XRD) образца песка

Резиновый порошок: В исследовании использовался мелкий резиновый порошок фракции 0,6–1,5 мм

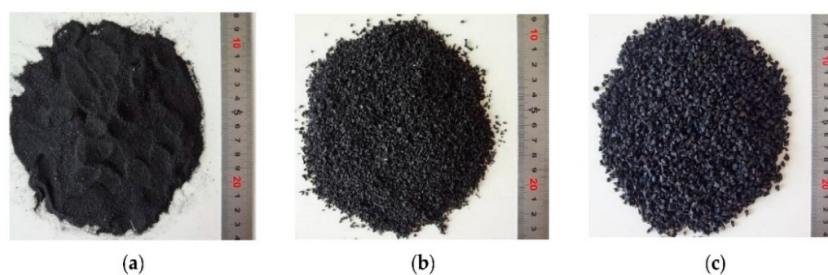


Рисунок 5. Разделение резинового порошка по фракциям

Таблица 6.

Основные физико-механические свойства резинового порошка

№	Основные свойства	Единица измерения	Значение показателей
1	Фракция резинового порошка	мм	0.6-1.5
2	Истинная плотность	кг/м ³	1100
3	Насыпная плотность	кг/м ³	407
4	Пустотность	%	63

Вода: для приготовления бетонной смеси использовалась вода питьевого качества. Применялась вода с показателем pH не ниже 4. Вода не содержала вредных химических и органических примесей, способных отрицательно повлиять на процесс твердения бетона.

Химические добавки: В настоящем исследовании для повышения прочности сцепления между резиновым порошком и цементом, а также с целью снижения расхода цемента использовались химические добавки. В качестве химической добавки применялся суперпластификатор Sika Latex, произведённый ООО «Sika» (г. Ташкент).

Результаты и их обсуждения

В настоящем исследовании в качестве частичной замены мелкого заполнителя (песка) использовался резиновый порошок фракцией 0,6–1,5 мм в количестве 20 % по объёму. Согласно многочисленным исследованиям, увеличение содержания резинового порошка может отрицательно влиять на механические свойства бетона, при этом наиболее приемлемым диапазоном замещения мелкого заполнителя считается 5–20 % [1, 2, 8, 10, 4, 11]. В связи с этим в настоящем исследовании были изготовлены бетонные образцы с содержанием резинового порошка 0 % (контрольный образец) и 20 % по объёму (фракция 0,6–1,0 мм). Образцы бетона с содержанием 20 % резинового порошка были предварительно обработаны латексная добавка Sika Latex, после чего были исследованы их механические свойства и изображения, полученные с использованием оптического микроскопа. Для бетонных образцов были проведены испытания на прочность при сжатии в возрасте 3, 7 и 28 суток. По результатам исследования установлено, что бетонные образцы, подвергнутые поверхностной обработке, латексная добавка Sika Latex, продемонстрировали более низкие механические показатели по сравнению с другими составами. Для определения прочности бетона на сжатие были изготовлены образцы кубической формы размером 100×100×100 мм. Образцы выдерживали в течение 28 суток при температуре 20±2 °C и относительной влажности не менее 95 %, после чего проводили испытания. Образец помещали в гидравлический пресс и прикладывали нагрузку 0,4 – 0,6 МПа, после чего полученные результаты были проанализированы.

В ходе эксперимента результаты испытаний на прочность при сжатии бетонных образцов с содержанием 0 % резинового порошка (контрольный бетон) и 20 % резинового порошка в возрасте 3, 7 и 28 суток представлены в таблице 7. Согласно полученным результатам, применение резинового порошка привело к снижению прочности на сжатие по сравнению с контрольным бетоном до 59,2 %, 51,8 % и 50,2 % в возрасте 3, 7 и 28 суток соответственно. Такое снижение прочности бетона на сжатие обусловлено главным образом изменением структуры бетонной матрицы вследствие замещения 20 % объёма песка

резиновым порошком. Из-за низкого модуля упругости и гидрофобной природы резинового порошка не формируется прочное сцепление с цементным камнем. В результате микропустоты и микротрещины развиваются более интенсивно.

Таблица 7.

Состав резинобетона и его прочность на сжатие

№	Тип состава	Цемент (кг)	Резиновый порошок (кг)	Щебень (кг)	Песок (кг)	Вода (л)	Прочность на сжатие, (МПа)		
							3 суток	7 суток	28 суток
1	Контрольный образец (0 %)	5.59	0	10.42	6.66	2.19	32.6	36.5	43,2
2	20 % резинового порошка	5.59	0.56	10.42	5.33	2.19	13.3	17.6	21,5

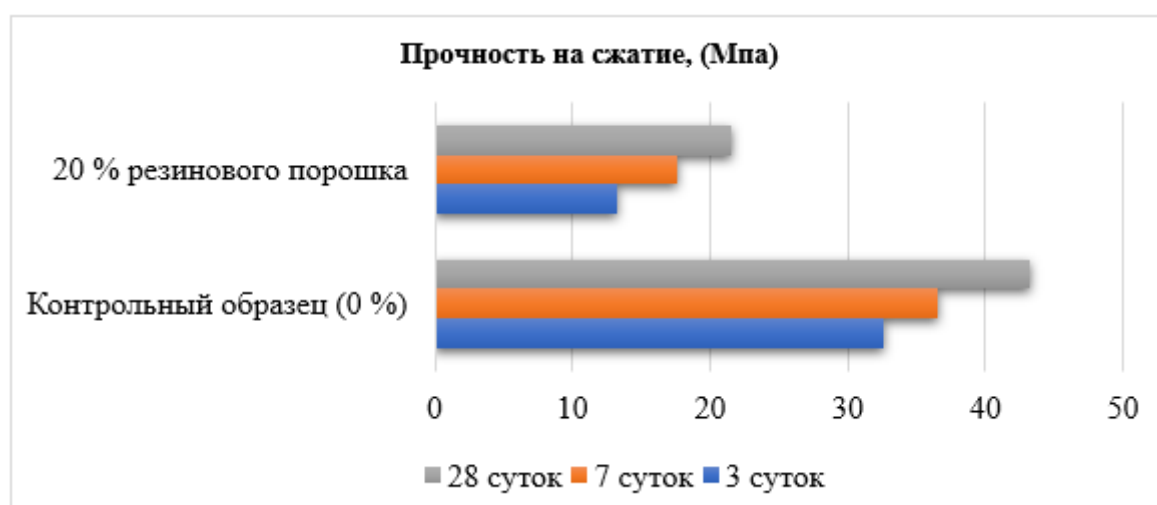


Рисунок 6. Результаты испытаний бетонных образцов на прочность при сжатии

Полученные результаты согласуются с данными исследования К. Batayneh и соавт. [1], в котором при замещении мелкого заполнителя (песка) 20 % его объёма резиновым порошком прочность бетона на сжатие в возрасте 28 суток составила 18,96 МПа. Аналогичные результаты были получены в исследованиях Y. Hu и соавт. [4] — 15,63 МПа, T. Uygunoğlu и соавт. [11] — 17,5 МПа, а также S. Thomas и соавт. [10] — 20 МПа. Во всех указанных исследованиях также было установлено, что применение 20 % резинового порошка приводит к значительному снижению прочности бетона на сжатие. Вместе с тем в исследованиях Liu и соавт. [8] при использовании 20 % резинового порошка была получена прочность 33,41 МПа, а в работе A. Dharsan и соавт. [2] — 34,25 МПа, что свидетельствует о сравнительно более высоких показателях прочности.



Рисунок 7. Поверхность сечения бетонного образца с добавлением резинового порошка

В настоящем исследовании для уменьшения количества микропустот и микротрещин в структуре бетона, а также улучшения сцепления между цементным камнем и резиновым порошком наиболее эффективным решением рассматривается модификация поверхности резинового порошка посредством её предварительной обработки. С этой целью в эксперименте были исследованы показатели прочности бетона на сжатие с использованием 20 % резинового порошка по объёму и латексная добавка Sika Latex, предназначенной для модификации цементных композиций. Полученные результаты были сопоставлены с результатами контрольного бетона. В ходе исследования поверхность резинового порошка обрабатывали латексная добавка Sika Latex в трёх различных составах, после чего полученные результаты были сравнительно проанализированы.

В первом составе сравнивались бетонные образцы, в которых для предварительной обработки поверхности резинового порошка использовалось 200 г Sika Latex и 100 г Sika Latex. При уменьшении количества Sika Latex до 100 г прочность на сжатие в возрасте 3, 7 и 28 суток снизилась на 8,0 %, 7,2 % и 6,6 % соответственно. При дальнейшем уменьшении содержания Sika Latex до 50 г снижение прочности оказалось ещё более выраженным и составило 16,0 %, 14,4 % и 13,1 % соответственно. Наилучшие результаты были получены при использовании 200 г Sika Latex. Однако даже в этом случае прочность на сжатие оказалась на 54,17 % ниже по сравнению с контрольным образцом и на 7,91 % ниже по сравнению с бетоном, содержащим 20 % резинового порошка по объёму без предварительной обработки. Основной причиной данного явления, вероятно, является снижение содержания Sika Latex, вследствие чего на поверхности частиц резинового порошка не формируется непрерывное и однородное полимерное покрытие. В таких условиях гидрофобная природа резины ограничивает её смачивание и взаимодействие с цементным тестом, что приводит к снижению прочности адгезионного контакта на границе раздела между цементным камнем и частицами резины. Это, в свою очередь, может способствовать развитию микропор и микротрещин в переходной зоне и, как следствие, снижению прочности бетона при сжатии.

Таблица 8.

Прочность на сжатие бетонов с резиновым порошком при использовании различных дозировок латексная добавки Sika Latex

№	Тип состава	Цемент (кг)	Резиновый порошок (кг)	Щебень (кг)	Песок (кг)	Вода (л)	Прочность на сжатие, (Мпа)		
							3 суток	7 суток	28 суток
1	200 г Sika Latex	5.59	0.56	10.42	5.33	2.19	12.5	16.7	19.8
2	100 г Sika Latex	5.59	0.56	10.42	5.33	2.19	11.5	15.5	18.5
3	50 г Sika Latex	5.59	0.56	10.42	5.33	2.19	10.5	14.3	17.2

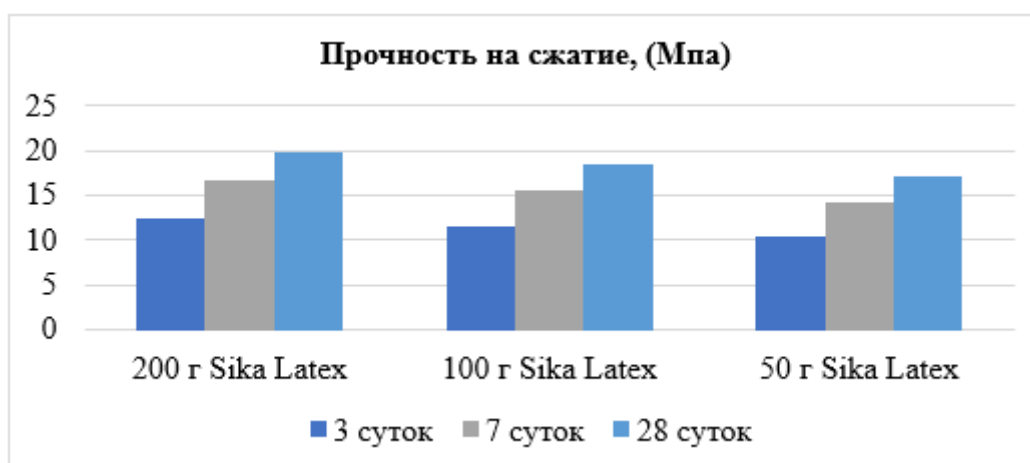


Рисунок 8. Изменение прочности на сжатие бетона на основе резинового порошка во времени при использовании различных дозировок латексная добавки Sika Latex

Кроме того, в настоящем исследовании был проведён микроструктурный анализ с целью изучения полимерного слоя, сформированного латексной добавкой Sika Latex на поверхности резинового порошка, оценки его равномерности распределения, степени покрытия поверхности частиц, а также его влияния на сцепление с цементным камнем



Рисунок 9. Микроскопическое изображение резинового порошка с добавлением 200 г Sika Latex

В образце, приготовленном с использованием 100 г Sika Latex и 100 г воды, наблюдалось лишь частичное формирование полимерного слоя

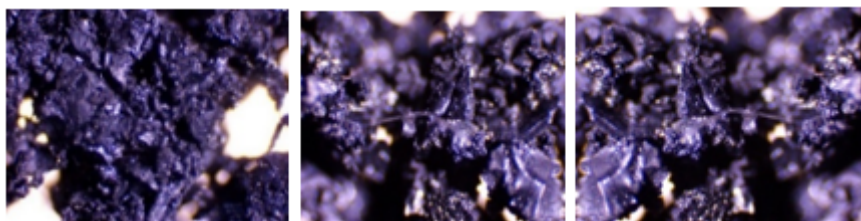


Рисунок 10. Микроскопическое изображение резинового порошка с добавлением 100 г Sika Latex и 100 г воды

В образце, приготовленном с использованием 150 г воды и 50 г Sika Latex, практически не наблюдалось формирования полимерного слоя на поверхности частиц резинового порошка. Микроструктурный анализ выявил наличие многочисленных пустот и неоднородных контактных поверхностей.



Рисунок 11. Микроскопическое изображение резинового порошка с добавлением 50 г Sika Latex и 150 г воды

Заключение

По результатам экспериментальных исследований установлено, что частичная замена мелкого заполнителя в составе бетона резиновым порошком, полученным из отработанных автомобильных шин, в количестве до 20 % по объёму оказывает существенное влияние на микроструктуру и физико-механические свойства бетона. Это обусловлено низким модулем упругости частиц резинового порошка, вследствие чего ухудшается качество сцепления между цементным камнем и резиной, образуются микропустоты и, как следствие, снижается прочность бетона на сжатие. Предварительная обработка резинового порошка латексная добавка Sika Latex не позволила повысить прочность бетона на сжатие до уровня контрольного образца. Это подтверждает необходимость дальнейшего совершенствования методов модификации поверхности резинового порошка. Использование резинового порошка, полученного из отработанных автомобильных шин, при производстве бетона является целесообразным для инженерных сооружений, спортивных площадок и конструкций, предназначенных для снижения вибрационных воздействий, где важное значение имеют такие эксплуатационные характеристики, как акустическая и теплоизоляционная эффективность.

Список литературы

1. Batayneh K., Marie I., Asi I. Promoting the use of crumb rubber concrete in developing countries [Электронный ресурс] // Waste Management. – 2008. – Т. 28, № 11. – P. 2171–2176. – DOI: 10.1016/j.wasman.2007.09.035.
2. Dharsan A., Arunsahayaraj S., Manikandan S., Satheesh Kumar P. Experimental investigation on properties of scrap rubber tyre as fine aggregate in concrete [Электронный ресурс] // E3S Web of Conferences. – 2023. – Т. 455. – DOI: 10.1051/e3sconf/202345503005.
3. He L., Ma Y., Liu Q., Mu Y. Surface modification of crumb rubber and its influence on the mechanical properties of rubber cement concrete [Электронный ресурс] // Construction and Building Materials. – 2016. – Т. 120. – P. 403–407. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.018.
4. Hu Y., Sun X., Ma A., Gao P.Y. An experimental study on the basic mechanical properties and compression size effect of rubber concrete with different substitution rates [Электронный ресурс] // Advances in Civil Engineering. – 2020. – Т. 2020. – DOI: 10.1155/2020/8851187.
5. Khern Y.C., Paul S.C., Kong S.Y., Babafemi A.J., Anggraini V. Miah.J., Šavija B. Impact of chemically treated waste rubber tire aggregates on mechanical, durability and thermal properties of concrete [Электронный ресурс] // Frontiers in Materials. – 2020. – Т. 7. – DOI: 10.3389/fmats.2020.00090.
6. Lafta M.J., Tobeia S.B., Khattab M.M., Mahdi F.Kh., Alhadi M.M. Investigating the mechanical properties of concrete using non-treated crumb rubber and silica fume [Электронный ресурс] // Research on Engineering Structures and Materials. – 2026. – Т. 12, № 1. – P. 441–450. – DOI: 10.17515/resm2025-939me0602rs.
7. Liu H., Wang X., Jiao Y., Sha T. Experimental investigation of the mechanical and durability properties of crumb rubber concrete [Электронный ресурс] // Materials. – 2016. – Т. 9, № 3. – DOI: 10.3390/ma9030172.
8. Liu H., Wang X., Jiao Y., Sha T. Experimental investigation of the mechanical and durability properties of crumb rubber concrete [Электронный ресурс] // Materials. – 2016. – Т. 9, № 3. – DOI: 10.3390/ma9030172.
9. Oluleye B.I., Chan D.W., Olawumi T.O., Saka A.B. Assessment of symmetries and asymmetries on barriers to circular economy adoption in the construction industry towards zero waste: a survey of international experts [Электронный ресурс] // Building and Environment. – 2023. – Т. 228. – DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109885.
10. Thomas B.S., Gupta R.C. Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber [Электронный ресурс] // Journal of Cleaner Production. – 2015. – Т. 113. – P. 86–92.
11. Uygunoğlu T., Topçu I.B. The role of scrap rubber particles on the drying shrinkage and mechanical properties of self-consolidating mortars [Электронный ресурс] // Construction and Building Materials. – 2010. – Т. 24, № 7. – P. 1141–1150. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.12.005.

-
12. Wu M., Tian W., He J., Liu F., Yang J. Seismic isolation effect of rubber-sand mixture cushion under different site classes based on a simplified analysis model [Электронный ресурс] // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2023. – Т. 166. – DOI: 10.1016/j.soildyn.2022.107738.
 13. Youssf O., Hassanli R., Mills J.E. Skinner., Ma X., Zhuge Y., Roychand R., Gravina R. Influence of mixing procedures, rubber treatment, and fibre additives on rubcrete performance [Электронный ресурс] // Journal of Composites Science. – 2019. – Т. 3, № 2.