

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-5-24-33

Балицкий Д.А., *Духанина У.Н., Строкова В.В., Сивальнева М.Н.
Белгородский государственный технический университет им. В.Г. Шухова
*E-mail: Duhanina777@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ МИКРОБНОЙ КАРБОНАТНОЙ БИОМИНЕРАЛИЗАЦИИ НА ПРОЧНОСТЬ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

Аннотация. В условиях интенсивной урбанизации, реновации жилищного фонда, чрезвычайных и стихийных бедствий возникают трудности в обращении с бетонными отходами. В связи с этим рециклинг отходов строительства и сноса зданий является эффективным решением экономии материальных и энергетических ресурсов в строительной области.

В статье рассматривается возможность оптимизации структуры и повышения прочностных характеристик бетона путем подбора зернового состава заполнителя на основе рециклированного бетонного лома и использования микробной карбонатной биоминерализации. Распределение на фракции зерен заполнителя (0,315–5 мм), представляющего собой измельченный рядовой камень СКЦт, имеет влияние на характер формирования контактных зон между цементной матрицей и заполнителем, что определяет снижение прочностных характеристик согласно следующей зависимости: с уменьшением крупности заполнителя прочность цементбетона растет. Добавление в состав цементной смеси биоминерализующего раствора приводит к улучшению адгезии цементного теста к поверхности заполнителя за счет образования в области контактного слоя дополнительных центров кристаллизации, коагуляции порового пространства индуцированными новообразованиями, что увеличивает прочность бетона, как в марочном возрасте, так и в прогнозируемом периоде.

Ключевые слова: карбонатная биоминерализация, бетонный лом, прогнозируемая прочность.

Введение. Бетон является классическим строительным материалом. Давняя история применения, высокие физико-механические характеристики, возможность придания ему различных функциональных свойств путем модифицирования, достаточная простота технологических этапов производства и другие признаки позволили зарекомендовать бетон как качественный и доступный материал. Однако современные достижения науки и техники, условия экологии и экономики, а также требования потребителей диктуют свои особенности и пути развития данной отрасли, определяя практические решения.

Известно, что основными компонентами бетона являются вяжущие вещества, которыми чаще всего выступают цемент и его разновидности; заполнитель крупный (щебень, гравий и др.) и мелкий (природный песок, отсева горных пород и др.); вода; добавки различного назначения. В связи с этим можно говорить о высокой ресурсоемкости данного материала, что в современных условиях переходит в статус проблемы ограниченности сырьевой базы, особенно, природного генезиса. Поэтому рациональным является использование альтернативных заполнителей и наполнителей техногенного происхождения, которыми выступают отходы производств, вторичные продукты промышленности и переработанные материалы: доменный шлак, карьерная пыль [1–4], кремнезем [5–7], отходы камнедробильной и металлургической промышленности [8], стальная стружка [9], нано- или углеродные волокна

[10], порошок оксида графена [11] и т.д. Сюда же можно отнести отходы строительства и сноса зданий, что, в условиях процесса урбанизации, роста экологических проблем современного города, возникающих случаях стихийных бедствий и чрезвычайных обстоятельств, в том числе военной обстановки в ряде регионов, связанной с проведением СВО, наиболее актуально. Таким образом, использование переработанного бетонного лома в качестве заполнителя в цементной системе при получении бетонных изделий и конструкций, а также реализация технологий рециклинга [12–16], является обоснованной тенденцией современного строительства.

Важность такого компонента, как заполнитель, определена морфологическими параметрами его распределения в объеме бетона (ориентацией, плотностью точек контакта и др.), что оказывает существенное влияние на адгезионное взаимодействие с матрицей и физико-механические характеристики композита, в целом. В виду того, что бетонный лом имеет в своем составе портландцемент, мелкий и крупный заполнитель, активные добавки, то велика роль влияния многофакторности на структурообразование «новой» системы. Использование заполнителя из отходов строительного лома сопряжено ограничением, которое связано с неравномерным распределением цементного камня на зернах заполнителя, что влияет на межфазную переходную зону реликтового композита с новообразующейся це-

ментной матрицей и вызывает снижение механических характеристик [17]. В связи с вышеуказанным и возможностью реализации природоподобных технологий, активно развивающихся в строительном материаловедении, предлагается использование микробной карбонатной биоминерализации [18, 19], что позволит улучшить однородность бетонной смеси за счет образования CaCO_3 в результате ферментативной активности бактерий рода *Bacillus* [20]. Модификация составов путем введения биоминерализующего раствора в бетонную смесь будет способствовать повышению прочности на сжатие путем индукции бактериальными культурами кристаллов карбоната кальция в капиллярно-поровом пространстве [21].

Однако, важно не только повысить показатели прочности, но и сохранить их на длительное время, т.е. обеспечить долговечность – это способность материала сохранять требуемые показатели качества при комплексном действии атмосферных и других факторов на весь период эксплуатации. Прогнозирование данного свойства с учетом рецептурных и эксплуатационных факторов имеет технологическую и экономическую значимость, заключающуюся, с одной стороны, в оценке долговечности материала и конструкции в целом, с другой – в увеличении межремонтных циклов обслуживания зданий и их общего срока службы при условии соблюдения требований эксплуатации.

Оценка долговечности бетона подразумевает длительные натурные испытания с контролем изменений свойств материалов под действием внешних агрессивных факторов. Использование математических методов моделирования процессов позволяет сократить время подобных исследований и осуществить прогнозную оценку. Одной из таких методик потенциального изменения прочностных характеристик в отдаленный период является расчет начальной скорости процесса и коэффициентов торможения и корреляции, предложенный проф. Ш.М. Рахмбаевым [22, 23]. Таким образом, оптимизация прочностных характеристик бетона путем подбора зернового состава заполнителя на основе бетонного лома и использования микробной карбонатной биоминерализации позволит разработать рациональный состав, обеспечивающий требуемые прочностные характеристики цементной матрицы в течение периода эксплуатации.

В данной работе исследуются закономерности изменения прочности во времени мелкозернистого бетона в зависимости от фракционного состава и содержания биоминерализующего раствора.

Материалы и методы. С целью оценки влияния микробной карбонатной биоминерализации на прочность бетона биоминерализующий состав (БС), представленный бактериальным инокулятом с прекурсорами, вводился в воду затворения и в дальнейшем смешивался с вяжущим и заполнителем. Для получения бактериального инокулята микроорганизмы *Bacillus pumilus* (ВКМ В-23) культивировались в питательной среде, состоящей из дистиллированной воды, пептона (30 г/л) и D-глюкозы (10 г/л). Для индукции карбоната кальция, образующегося в процессе ферментативной активности бактерий, использовали прекурсоры: CaCl_2 (20 г/л) и $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ (20 г/л).

Согласно проведенным ранее исследованиям установлена наиболее рациональная концентрация по отношению к массе вяжущего биоминерализующего раствора, вводимого путем замены части воды затворения, которая не оказывает отрицательного влияния на прочностные характеристики и составляет 8 % [24].

Чтобы исключить влияние других микроорганизмов на ход исследования, используемые материалы проходили предварительную стерилизацию до введения бактериальных культур: вода затворения – методом автоклавирования; прекурсоры CaCl_2 и $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$, а также вяжущее – методом УФ-стерилизации. Процесс формирования образцов осуществлялся в стерильных условиях.

Далее с целью оценки прочностных характеристик были заформованы образцы размером $20 \times 20 \times 20$ мм. В качестве вяжущего использовался портландцемент марки ЦЕМ I 42,5 Н производства ОА «Себряковцемент» (г. Михайловка, Волгоградская область), удовлетворяющего требованиям ГОСТ 31108–2020. В качестве мелкого заполнителя применялся лом некондиционного стенового камня на цементном вяжущем из тяжелого бетона, маркируемый согласно товарной номенклатуре АО «Завод ЖБК-1» г. Белгорода СКЦг. Следует отметить, что используемый заполнитель был получен в результате помола лома, измельченного в щековой дробилке ЩД10, после 5–8 лет хранения товарных изделий. Для исследования использовался следующий зерновой состав, мм: 0,315–0,63; 0,63–1,25; 1,25–2,5; 2,5–5. Водоцементное отношение принималось за постоянную величину, соответствующую значению 0,32.

Оценка влияния мелкого рециклированного заполнителя на цементную систему при добавлении биоминерализующего раствора для активации микробной карбонатной биоминерализации предполагает комплекс работ по выбору рациональной рецептуры композита. В связи с чем в

данной работе использовались следующие компонентные составы бетона на основе портландцемента с фракционированным заполнителем (табл. 1):

– ПЦ (контроль): портландцемент с водой затворения;

– ПЦ+БС: портландцемент с водой затворения при добавлении биоминерализующего раствора;

– ПЦ+СКЦт: портландцемент с водой затворения с добавлением СКЦт различных фракций;

– ПЦ+БС+СКЦт: портландцемент с водой затворения с добавлением СКЦт различных фракций и биоминерализующего раствора.

Прочность на сжатие определялась на гидравлическом прессе ПГМ-100МГ4 согласно ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам» [25].

Микрофотографии сколов образцов получены с использованием стереоскопического микроскопа Ломо МСП-2 вариант 3.

С целью оценки вклада бактериальных культур в процессы биоминерализации в системе «цементный камень – заполнитель – биоминерализующий состав», рециклированный заполнитель вводился в количестве 5 % от массы вяжущего, что позволило установить закономерности изменения прочности на сжатие от фракционного состава и эффективности микробной карбонатной биоминерализации.

Основная часть. Для количественной оценки характера влияния биоминерализующего раствора на прочностные характеристики с целью установления взаимосвязи зернового состава

мелкого заполнителя и микробной карбонатной биоминерализации были заформованы образцы кубы следующих составов цементного камня:

– ПЦ, являющийся контрольным составом с целью проведения дальнейшего сопоставления результатов;

– ПЦ+БС: данный состав отличается введением биоминерализующего раствора (в количестве 8 % от массы цемента) в составе воды затворения с ее частичной заменой;

– ПЦ+СКЦт (0,315–0,63), ПЦ+СКЦт (0,63–1,25), ПЦ+СКЦт (1,25–2,5), ПЦ+СКЦт (2,5–5): данный ряд составов отличается добавлением заполнителя в виде лома из СКЦт различных фракций (0,315–0,63, 0,63–1,25, 1,25–2,5 и 2,5–5 мм, соответственно). Заполнитель вводился в количестве 5 % от массы цемента;

– ПЦ+СКЦт+БС (0,315–0,63), ПЦ+СКЦт+БС (0,63–1,25), ПЦ+СКЦт+БС (1,25–2,5), ПЦ+СКЦт+БС (2,5–5): данные составы направлены на выявление комплексного влияния заполнителя техногенного происхождения при различном фракционном разделении и микробной карбонатной биоминерализации, а именно, роли бактериальных культур, индуцирующих кристаллообразование карбоната кальция в результате ферментативной активности, на прочность цементного камня. Концентрации компонентов сохраняются и указаны выше.

Кинетика набора прочности цементного камня на сжатие образцов-кубов определялась на 3, 7, 14, 21 и 28 суток твердения при нормальных условиях (табл. 1).

Таблица 1

Кинетика твердения образцов цементного камня в зависимости от состава, МПа

№ состава	Условное обозначение состава	Время твердения, сутки					Направление снижения значений
		3	7	14	21	28	
1	ПЦ+БС	35	54	57	59	64	
2	ПЦ (контроль)	40	42	45	56	62	
3	ПЦ+СКЦт+БС (0,315–0,63)	38	46	48	54	58	
4	ПЦ+СКЦт+БС (0,63–1,25)	43	49	53	57	57	
5	ПЦ+СКЦт+БС (1,25–2,5)	39	40	42	51	57	
6	ПЦ+СКЦт+БС (2,5–5)	35	42	49	54	55	
7	ПЦ+СКЦт (0,315–0,63)	43	51	52	53	54	
8	ПЦ+СКЦт (0,63–1,25)	33	34	44	44	53	
9	ПЦ+СКЦт (1,25–2,5)	30	39	43	45	49	
10	ПЦ+СКЦт (2,5–5)	29	35	40	42	45	

На основании полученных данных выстраивается убывающая последовательность значений предела прочности при сжатии в возрасте 28 суток в зависимости от состава. Установлено, что наибольшее значение показателя прочности на 28 суток имеет состав ПЦ+БС (64 МПа), что на 3 % больше прочности контрольного образца. Минимальным значением характеризуется образец

ПЦ+СКЦт (2,5–5) (45 МПа), т.е. цементный камень, содержащий заполнитель из бетонного лома с наибольшим размером зерен 2,5–5 мм.

Следует отметить положительное влияние от введения биоминерализующего раствора в состав цементной системы. В тоже время использование заполнителя из лома СКЦт приводит к сни-

жению прочности на 13–28 % в сравнении с контрольным образцом. При этом наблюдается устойчивая тенденция: чем выше фракционный размер заполнителя, тем ниже прочность на сжатие. Комплексные составы ПЦ+СКЦт+БС характеризуются аналогичным снижением прочности, но в меньшей степени (7–11 % от прочности образца ПЦ). Объяснением может являться недостаточная адгезионная прочность вяжущего к вторичному заполнителю, а также пустотность композита, вызванная неоднородностью структуры при введении более крупных зерен. Предположительно, повышение дисперсности бетонного лома и применение полифракционного состава заполнителя позволит увеличить плотность упаковки системы, ограничить снижение прочности, и, возможно, привести к ее росту. Полиmodalный зерновой состав вторичного заполнителя обеспечит компактное распределение более мелких частиц в крупных пустотах.

Исследование микроструктуры внутренней

поверхности образцов в области контактного слоя цементного теста с заполнителем указывает на согласованность с полученными прочностными характеристиками. Так, образование контракционных пор в цементобетоне вокруг зерен СКЦт фракции 2,5–5 привело к снижению прочности на 18 % по сравнению с образцом с БС. Заполнитель из молотого СКЦт фракции 0,315–0,63 в меньшей степени снижает прочность образцов, что обусловлено более прочным адгезионным сцеплением между ним и цементной матрицей.

При добавлении биоминерализующего состава в цементобетон наблюдается заполнение кристаллическими новообразованиями пустот, формирование однородной структуры с низкой степенью дефектности (рис. 1, б). Оценка вклада бактерий *Bacillus pumilus*, как индукторов осаждения карбоната, характеризуется визуализирующейся кольматацией пор и обрастанием кристаллических новообразований на внутренней и внешней поверхности мелкого заполнителя.

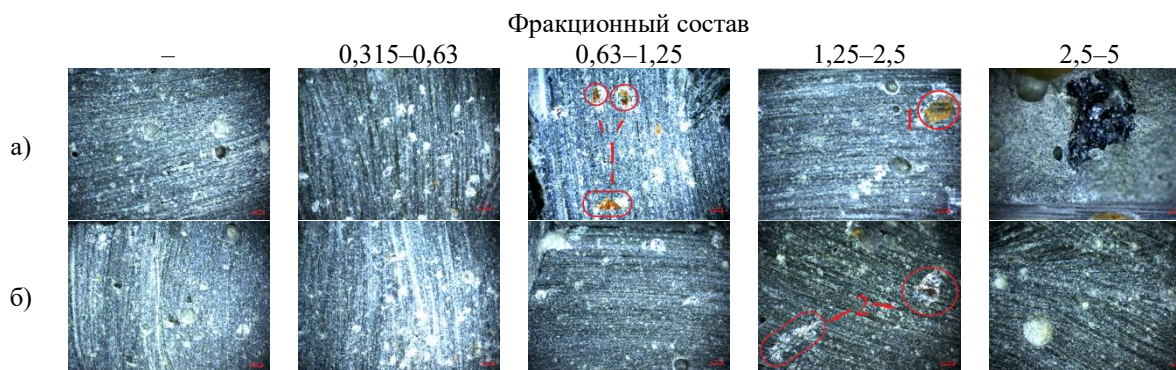


Рис. 1. Структура спила образцов бетона в зависимости от фракционного распределения зерен заполнителя: а – без добавления БС; б – с добавлением БС:

1 – заполнитель без изменений, 2 – заполнитель после биоминерализации

В результате микробно-индуцированного осаждения кальцита отчетливо просматриваются множественные формирования кристаллов на участках капиллярных пор, наблюдается обрастание новообразованиями зерен заполнителя, а также их прораствание внутрь, что приводит к повышению прочности цементного камня (рис. 1).

Произведено ранжирование составов по увеличению прочности на сжатие в возрасте 28 суток твердения: ПЦ+СКЦт (2,5–5) → ПЦ+СКЦт (1,25–2,5) → ПЦ+СКЦт (0,63–1,25) → ПЦ+СКЦт (0,315–0,63) → ПЦ+СКЦт +БС (2,5–5) → ПЦ+СКЦт +БС (1,25–2,5) → ПЦ+СКЦт +БС (0,63–1,25) → ПЦ+СКЦт +БС (0,315–0,63) → ПЦ (контроль) → ПЦ+БС.

Оценка долговечности цементного камня исследуемых составов была произведена на основании теории переноса, представленной в методике

Рахимбаева Ш.М., и показана расчетом долгосрочной прочности материала [22, 23]. Прогнозируемая прочность в отдаленный период имеет общую закономерность для всех составов. Наиболее интенсивный набор прочности осуществляется в диапазоне 14–50 суток. При достижении 200 суток наблюдается замедление процессов набора прочности, а с 400 суток – практически останавливается (рис. 2).

Анализ результатов показал, что образцы с разным фракционным составом заполнителя имели практически схожую тенденцию роста прочности на 28 суток в пределах 11–29 МПа. При этом в образце ПЦ+БС в период с 14 по 400 суток наблюдался скачок набора прочности до максимально имеющегося значения (64 МПа). Разница между максимальным и минимальным значением прочности составляет порядка 19 МПа.

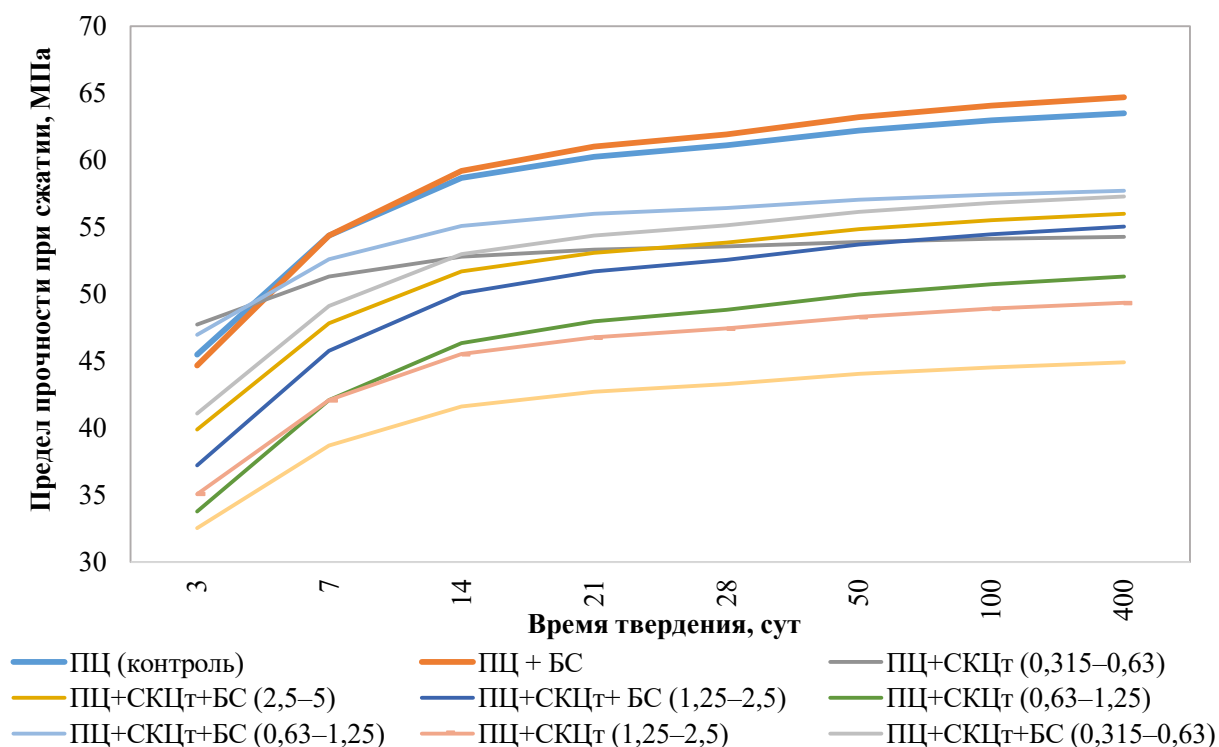


Рис. 2. Кинетика набора прочности цементобетона в зависимости от состава

Согласно данным таблицы 2 и рисунка 3 видно, что начальная скорость твердения (U_0) резко увеличивается в составе ПЦ+СКЦт (0,315–0,63), а коэффициент торможения не имеет максимальных значений. В целом добавление СКЦт различного фракционного состава не оказало значительного влияния на торможение процесса

твердения цементобетона (табл. 2, рис. 4). Следовательно, можно сделать вывод, что введение мелкого заполнителя из лома СКЦт в цементную матрицу приводит к понижению прочности в первые сутки твердения, а в дальнейший прогнозируемый срок отрицательного влияния на твердение не наблюдается.

Таблица 2

Результаты расчета по уравнениям теории переноса

Условное обозначение состава	Значения энергетических констант при расчете		
	U_0	K_{tor}	K_{kor}
ПЦ+БС	48	0,0154	0,9965
ПЦ (контроль)	53	0,0157	0,9959
ПЦ+СКЦт+БС (0,315–0,63)	48	0,0174	0,9952
ПЦ+СКЦт+БС (0,63–1,25)	84	0,0173	0,9989
ПЦ+СКЦт+БС (1,25–2,5)	38	0,0181	0,987
ПЦ+СКЦт+БС (2,5–5)	46	0,0178	0,9967
ПЦ+СКЦт (0,315–0,63)	131	0,0184	0,9997
ПЦ+СКЦт (0,63–1,25)	33	0,0194	0,9875
ПЦ+СКЦт (1,25–2,5)	40	0,0202	0,9963
ПЦ+СКЦт (2,5–5)	39	0,0222	0,9971

Согласно показателям начальной скорости твердения U_0 введение биоминерализующего состава в цементную систему приводит к увеличению начальных сроков схватывания. При этом коэффициент торможения свидетельствует, что образцы при добавлении биоминерализующего будут иметь высокие показатели прочности в отдаленные сроки твердения.

Следует отметить, что расчетные величины

прочности исследуемых образцов при 28 сутках сопоставимы с экспериментальными данными (расхождение между результатами составляет не более 5 %). Однако, у двух составов (ПЦ+СКЦт+БС (1,25–2,5); ПЦ+СКЦт (0,63–1,25)) регистрируются данные $\Delta\sigma_{отн}$ более 5 %, но не превышают 10 % порога, что является приемлемым показателем (табл. 3).

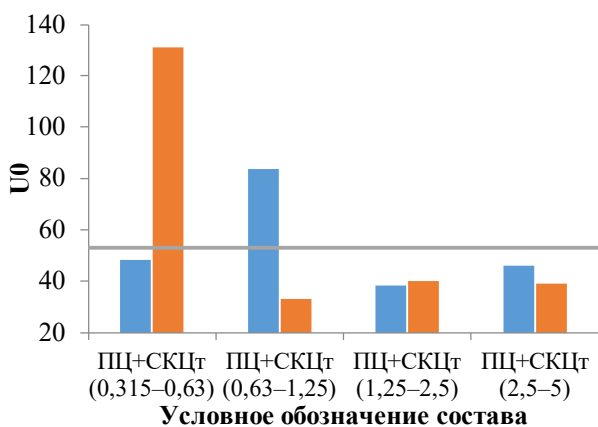


Рис. 3. Зависимость начальной скорости твердения от состава

■ с БС ■ без БС ■ контроль

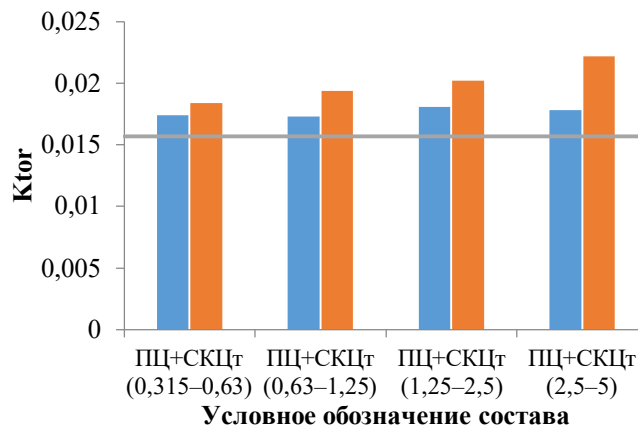


Рис. 4. Зависимость торможения процесса твердения от состава

Таблица 3

Сравнение экспериментальных и рассчитанных величин прочности цементного камня в возрасте 28 суток

Условное обозначение состава	Прочность цементного камня (σ), МПа		Отклонения		Оценка*
	$\sigma_{расч}$	$\sigma_{эксперим}$	$\Delta\sigma_{абс}$, МПа	$\Delta\sigma_{отн}$, %	
ПЦ+БС	64	62	2	3	●
ПЦ (контроль)	62	61	1	2	●
ПЦ+СКЦГ+БС (0,315-0,63)	58	55	3	5	●
ПЦ+СКЦГ+БС (0,63-1,25)	57	56	1	2	●
ПЦ+СКЦГ+БС (1,25-2,5)	57	53	4	8	●
ПЦ+СКЦГ+БС (2,5-5)	55	54	1	2	●
ПЦ+СКЦГ (0,315-0,63)	54	54	0	0	●
ПЦ+СКЦГ (0,63-1,25)	53	49	4	8	●
ПЦ+СКЦГ (1,25-2,5)	49	47	2	4	●
ПЦ+СКЦГ (2,5-5)	45	43	2	5	●

*Цветовая индикация показателей в соответствии с уровнем отклонения $\sigma_{эксперим}$ от $\sigma_{расч}$:

- – отклонение не более 4,9 %;
- – отклонение не более 10 %.

Образец, в котором частично заменена вода затворения на питательную среду с бактериями и прекурсорами, характеризуется максимальной прогнозируемой прочностью, что сопоставляется с полученными результатами. Таким образом, в результате микробной карбонатной биоминерализации происходит увеличение прочности цементного камня, что может быть обусловлено кольматацией пор, образованием кристаллических сростков вокруг зерен заполнителя, в свою очередь, приводящее к увеличению плотности образцов.

Выводы.

1. Рассматривается возможность оптимизации структуры и повышения прочностных характеристик бетона путем подбора зернового состава заполнителя на основе бетонного лома и использования микробной карбонатной биоминерализации.

2. Размер зерен рециклированного заполнителя, представляющего собой измельченный стеновой камень, оказывает влияние на характер формирования контактных зон между цементным раствором и заполнителем, что определяет снижение прочностных характеристик. Отмечается следующая зависимость: чем выше крупность заполнителя, тем ниже прочность на сжатие.

3. Содержание биоминерализующего раствора в составе цементного вяжущего обеспечивает формирование более плотной структуры вследствие зарастания пор и дополнительных центров кристаллообразования в контактном слое между заполнителем и цементным тестом. Заполнение межчастичного пространства кристаллическими новообразованиями, индуцированными в результате ферментативной активности бактерий *Bacillus pumilus*, и их интеграция в

тело заполнителя привело к увеличению прочности на сжатие. Сопоставление экспериментальных значений прочности на сжатие образцов с расчетными данными прогнозируемой прочности в отдаленный период времени дает удовлетворительную сходимость, что позволяет их рекомендовать для дальнейшего исследования.

4. В дальнейшей перспективе исследований представляется целесообразным рассмотреть увеличение дозировки фракции 0,315–0,63 в модельной системе ПЦ+СКЦт+БС с целью подбора оптимального рецептурного состава для реализации комплекса мер по использованию рециклированного заполнителя и микробной карбонатной биоминерализации.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках реализации государственного задания Минобрнауки РФ № FZWN-2023-0006 с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Yum W.S., Do J. Use of bacteria to activate ground-granulated blast-furnace slag (GGBFS) as cementless binder // *Materials*. 2022. Vol. 15. Iss. 10. Article number 3620. DOI: 10.3390/ma15103620.
2. Dos Santos Barreto E., Stafanato K.V., Marvila M.T., De Azevedo A.R.G., Ali M., Pereira R.M.L., Monteiro S.N. Clay ceramic waste as pozzolan constituent in cement for structural concrete // *Materials*. 2021. Vol. 14. Iss. 11. Article number 2917. DOI: 10.3390/ma14112917.
3. Biswal U.S., Dinakar P. A mix design procedure for fly ash and ground granulated blast furnace slag based treated recycled aggregate concrete // *Cleaner Engineering and Technology*. 2021. Vol. 5. 100314. DOI: 10.1016/j.clet.2021.100314.
4. Xie J., Zhao J., Wang J., Fang C., Yuan B., Wu Y. Impact behaviour of fly ash and slag-based geopolymetric concrete: The effects of recycled aggregate content, water-binder ratio and curing age // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 331. 127359. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127359.
5. Li L., Xuan D., Sojobi A.O., Liu S., Chu S.H., Poon C.S. Development of nano-silica treatment methods to enhance recycled aggregate concrete // *Cement and Concrete Composites*. 2021. Vol. 118. Article number 103963. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.103963.
6. Bogas J.A., Real S., Ferrer B. Biphasic carbonation behaviour of structural lightweight aggregate concrete produced with different types of binder // *Cement and Concrete Composites*. 2016. Vol. 71. Pp. 110–121. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2016.05.006.
7. Güneçyisi E., Gesoğlu M., Altan İ., Öz H.Ö. Utilization of cold bonded fly ash lightweight fine aggregates as a partial substitution of natural fine aggregate in self-compacting mortars // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 74. Pp. 9–16. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.10.021.
8. Baeza F., Payá J., Galao O., Saval J.M., Garcés P. Blending of industrial waste from different sources as partial substitution of portland cement in pastes and mortars // *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 66. Pp. 645–653. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.089.
9. Choi S.Y., Kim I.S., Yang E.I. Comparison of drying shrinkage of concrete specimens recycled heavyweight waste glass and steel slag as aggregate // *Materials*. 2020. Vol. 13. Iss. 22. Article number 5084. DOI: 10.3390/ma13225084.
10. Петрунин С.Ю., Ваганов В.Е., Закревская Л.В. Прочность на сжатие и микроструктура цементного композита с добавкой карбоксилированных углеродных нанотрубок // *Известия высших учебных заведений. Серия Химия и химическая технология*. 2013. № 5. С. 106–111.
11. Long W.-J., Wei J.-J., Ma H., Xing F. Dynamic mechanical properties and microstructure of graphene oxide nanosheets reinforced cement composites // *Nanomaterials*. 2017. Vol. 7. 407. DOI: 10.3390/nano7120407.
12. Дуань Ю., Кандаурова Н.М., Иванова Г.П. Технология строительства с применением рециклированного бетона // *Труды Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин)*. 2020. Т. 23. № 2 (76). С. 108–119.
13. Zajac M., Skocek J., Durdzinski P., Bullerjahn F., Skibsted J., Ben Haha M. Effect of carbonated cement paste on composite cement hydration and performance // *Cement and Concrete Research*. 2020. Vol. 134. 106090. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106090.
14. Lu B., Shi C., Cao Z., Guo M., Zheng J. Effect of carbonated coarse recycled concrete aggregate on the properties and microstructure of recycled concrete // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 233. Pp. 421–428. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.350.
15. He Z., Han X., Zhang M., Yuan Q., Shi J., Zhan P. A Novel development of green UHPC containing waste concrete powder derived from construction and demolition waste // *Powder Technology*. 2021. Vol. 398. 117075. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.117075.
16. Аббас З.А., Баркая Т.Р., Гавриленко А.В. Экспериментальное исследование механических свойств рециклированных бетонов // *Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения*. 2017. № 1. С. 1–9.

17. Marvila M, de Matos P, Rodríguez E, Monteiro SN, de Azevedo ARG. Recycled aggregate: A viable solution for sustainable concrete production // Materials. 2022. Vol. 30. Iss. 15. 5276. DOI: 10.3390/ma15155276.

18. Строкова В.В., Власов Д.Ю., Франк-Каменецкая О.В. Микробная карбонатная биоминерализация как инструмент природоподобных технологий в строительном материаловедении // Строительные материалы. 2019. № 7. С. 66–72. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-772-7-66-72.

19. Строкова В.В., Власов Д.Ю., Франк-Каменецкая О.В., Духанина У.Н., Балицкий Д.А. Применение микробной карбонатной биоминерализации в биотехнологиях создания и восстановления строительных материалов: анализ состояния и перспективы развития // Строительные материалы. 2019. № 9. С. 83–103. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-774-9-83-103.

20. Zhu Y., Li Q., Xu P., Wang X., Kou S. Properties of concrete prepared with recycled aggregates treated by bio-deposition adding oxygen release compound // Materials. 2019. Vol. 12. Iss. 13. 2147. DOI: 10.3390/ma12132147.

21. Shukla A., Gupta N., Singh K.R., Kumar Verma P., Bajaj M., Khan A.A., Ayalew F. Performance evaluation of bio concrete by cluster and regression analysis for environment protection // Computational Intelligence and Neuroscience. 2022. Vol. 2022. Pp. 1–12. DOI: 10.1155/2022/4411876.

22. Рахимбаев Ш.М., Авершина Н.М. Прогнозирование долговечности строительных материалов // Ресурсосберегающие технологии строительных материалов, изделий и конструкций. Белгород: Везелица. 1993. С. 8.

23. Рахимбаев Ш.М., Авершина Н.М. Прогнозирование долговечности строительных материалов по единичному сроку испытания // Строительные материалы. 1994. №4. С. 17–18.

24. Stroková V.V., Nelyubova V.V., Duhaniina U.N., Balitsky D.A., Drozdov O.I. Effect of agents of initiation of carbonate biomineralization on cement properties // Materials Science Forum. 2021. Vol. 1040. Pp. 159–164. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1040.159.

25. ГОСТ 21192–2012. Бетоны. Классификация и общие технические требования. Введ. 2013–07–01. М.: Стандартинформ, 2013. 6 с.

Информация об авторах

Балицкий Дмитрий Андреевич, аспирант кафедры материаловедения и технологий материалов. E-mail: bob.stalker2012@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Духанина Ульяна Николаевна, младший научный НИИ НСМ, ИНО и ОПЦ НКМ БГТУ им. В.Г. Шухова. E-mail: Duhaniina777@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Строкова Валерия Валерьевна, доктор технических наук, профессор. E-mail: vvstrokova@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Сивальнева Мариана Николаевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры материаловедения и технологии материалов. E-mail: 549041@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 08.04.2024 г.

© Балицкий Д.А., Духанина У.Н., Строкова В.В., Сивальнева М.Н., 2024

Balitsky D.A., *Dukhanina U.N., Stroková V.V., Sivalneva M.N.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova

**E-mail: Duhaniina777@yandex.ru*

INFLUENCE OF MICROBIAL CARBONATE BIOMINERALIZATION ON THE STRENGTH OF CEMENT STONE

Abstract. *An intensive urbanization, renovation of housing stock, emergencies and natural disasters lead to difficulties arise in the management of concrete waste. In this regard, recycling construction and demolition waste is an effective solution for saving material and energy resources in the construction field.*

The article discusses the possibility of optimizing the structure and increasing the strength characteristics of concrete by selecting the grain composition of the aggregate based on recycled concrete scrap and the use of microbial carbonate biomineralization. The distribution of aggregate grains (0.315–5 mm), which is crushed ordinary stone SKTs, into fractions has an impact on the nature of the formation of contact zones between the

cement matrix and the aggregate. This determines a decrease in strength characteristics according to the following relationship: with a decrease in the size of the aggregate, the strength of cement concrete increases. The addition of a biomineralizing solution to the cement mixture leads to improved adhesion of the cement paste to the surface of the aggregate due to the formation of additional crystallization centers in the area of the contact layer, clogging of the pore space with induced new formations, which increases the strength of concrete, both at brand age and in the forecast period.

Keywords: carbonate biomineralization, concrete scrap, predicted strength.

REFERENCES

1. Yum W.S., Do J. Use of bacteria to activate ground-granulated blast-furnace slag (GGBFS) as cementless binder. *Materials*. 2022. Vol. 15. Iss. 10. Article number 3620. DOI: 10.3390/ma15103620.
2. Dos Santos Barreto E., Stafanato K.V., Marvila M.T., De Azevedo A.R.G., Ali M., Pereira R.M.L., Monteiro S.N. Clay ceramic waste as pozzolan constituent in cement for structural concrete. *Materials*. 2021. Vol. 14. Iss. 11. Article number 2917. DOI: 10.3390/ma14112917.
3. Biswal U.S., Dinakar P. A mix design procedure for fly ash and ground granulated blast furnace slag based treated recycled aggregate concrete. *Cleaner Engineering and Technology*. 2021. Vol. 5. P. 100314. DOI: 10.1016/j.clet.2021.100314.
4. Xie J., Zhao J., Wang J., Fang C., Yuan B., Wu Y. Impact behaviour of fly ash and slag-based geopolymeric concrete: The effects of recycled aggregate content, water-binder ratio and curing age. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 331. 127359. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127359.
5. Li L., Xuan D., Sojobi A.O., Liu S., Chu S.H., Poon C.S. Development of nano-silica treatment methods to enhance recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2021. Vol. 118. Article number 103963. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.103963.
6. Bogas J.A., Real S., Ferrer B. Biphasic carbonation behaviour of structural lightweight aggregate concrete produced with different types of binder. *Cement and Concrete Composites*. 2016. Vol. 71. Pp. 110–121. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2016.05.006.
7. Güneş E., Gesoğlu M., Altan İ., Öz H.Ö. Utilization of cold bonded fly ash lightweight fine aggregates as a partial substitution of natural fine aggregate in self-compacting mortars. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 74. Pp. 9–16. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.10.021.
8. Baeza F., Payá J., Galao O., Saval J.M., Garcés P. Blending of industrial waste from different sources as partial substitution of portland cement in pastes and mortars. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 66. Pp. 645–653. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.089.
9. Choi S.Y., Kim I.S., Yang E.I. Comparison of drying shrinkage of concrete specimens recycled heavyweight waste glass and steel slag as aggregate. *Materials*. 2020. Vol. 13. Iss. 22. Article number 5084. DOI: 10.3390/ma13225084.
10. Petrunin S.Yu., Vaganov V.E., Zakrevskaya L.V. Compressive strength and microstructure of a cement composite with the addition of carboxylated carbon nanotubes [Prochnost' na szhatiye i mikrostruktura tsementnogo kompozita s dobavkoy karboksilirovannykh uglerodnykh nanotrubok]. *News of higher educational institutions. Series Chemistry and chemical technology*. 2013. No. 5. Pp. 106–111. (rus)
11. Long W.-J., Wei J.-J., Ma H., Xing F. Dynamic mechanical properties and microstructure of graphene oxide nanosheets reinforced cement composites. *Nanomaterials*. 2017. Vol. 7. 407. DOI: 10.3390/nano7120407.
12. Duan Yu., Kandaurova N.M., Ivanova G.P. Construction technology using recycled concrete [Tekhnologiya stroitel'stva s primeneniym retsiklirovannogo betona]. *Proceedings of the Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin)*. 2020. Iss. 23. No. 2 (76). Pp. 108–119. (rus)
13. Zajac M., Skocek J., Durdzinski P., Bullerjahn F., Skibsted J., Ben Haha M. Effect of carbonated cement paste on composite cement hydration and performance. *Cement and Concrete Research*. 2020. Vol. 134. 106090. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106090.
14. Lu B., Shi C., Cao Z., Guo M., Zheng J. Effect of carbonated coarse recycled concrete aggregate on the properties and microstructure of recycled concrete. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 233. Pp. 421–428. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.350.
15. He Z., Han X., Zhang M., Yuan Q., Shi J., Zhan P. A Novel development of green UHPC containing waste concrete powder derived from construction and demolition waste. *Powder Technology*. 2021. Vol. 398. 117075. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.117075.
16. Abbas Z.A., Barkaya T.R., Gavrilenko A.V. Experimental study of the mechanical properties of recycled concrete [Eksperimental'noye issledovaniye mekhanicheskikh svoystv retsiklirovannykh betonov]. *Safety of the Russian construction fund. Problems and solutions*. 2017. No 1. Pp. 1–9. (rus)
17. Marvila M., de Matos P., Rodríguez E.,

Monteiro S.N., de Azevedo A.R.G. Recycled aggregate: A viable solution for sustainable concrete production. *Materials*. 2022. Vol. 30. Iss. 15. 5276. DOI: 10.3390/ma15155276.

18. Strokova V.V., Vlasov D.Yu., Frank-Kamenskaya O.V. Microbial carbonate biomineralisation as a tool of natural-like technologies in construction material science. *Construction Materials*. 2019. No. 7. Pp. 66–72. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-772-7-66-72. (rus)

19. Strokova V.V., Vlasov D.Yu., Frank-Kamenskaya O.V., Dukhanina U.N., Balitsky D.A. The use of microbial carbonate biomineralization in biotechnology the creation and restoration of building materials: analysis of the state and development prospects. *Construction Materials*. 2019. No. 9. Pp. 83–103. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-774-9-83-103.

20. Zhu Y., Li Q., Xu P., Wang X., Kou S. Properties of concrete prepared with recycled aggregates treated by bio-deposition adding oxygen release compound. *Materials*. 2019. Vol. 12. Iss. 13. 2147. DOI: 10.3390/ma12132147.

21. Shukla A., Gupta N., Singh K.R., Kumar Verma P., Bajaj M., Khan A.A., Ayalew F. Perfor-

mance evaluation of bio concrete by cluster and regression analysis for environment protection. *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2022. Vol. 2022. Pp. 1–12. DOI: 10.1155/2022/4411876.

22. Rakhimbayev Sh.M., Avershina N.M. Prediction of the durability of building material [Prognozirovanie dolgovechnosti stroitel'nyh materialov]. Resource-saving technologies of building materials, products and structures. Belgorod: Veselitsa. 1993. Pp. 8. (rus)

23. Rakhimbayev Sh.M., Avershina N.M. Prediction of the durability of building materials by a single test period [Prognozirovanie dolgovechnosti stroitel'nyh materialov po edinichnomu sroku ispytaniya]. *Stroitel'nye Materialy*. 1994. No. 4. Pp. 17–18. (rus)

24. Strokova V.V., Nelyubova V.V., Duhanina U.N., Balitsky D.A., Drozdov O.I. Effect of agents of initiation of carbonate biomineralization on cement properties. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1040. Pp. 159–164. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1040.159.

25. GOST 58401.2. Concrete. Classification and general technical requirements [Betony. Klassifikatsiya i obshchiye tekhnicheskiye trebovaniya]. Enter 2013-07-01. M.: Standardinform, 2013. 6 p. (rus)

Information about the authors

Balitsky, Dmitry A. Master student. E-mail: bob.stalker2012@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Strokova, Valeria V. DSc, Professor. E-mail: vvstrokova@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Dukhanina, Ulyana N. Postgraduate student. E-mail: duhanina777@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Sivalneva, Mariana N. PhD, Assistant professor. E-mail: 549041@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 08.04.2024

Для цитирования:

Балицкий Д.А., Духанина У.Н., Строкова В.В., Сивальнева М.Н. Влияние микробной карбонатной биоминерализации на прочность цементного камня // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №5. С. 24–33. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-5-24-33

For citation:

Balitsky D.A., Dukhanina U.N., Strokova V.V., Sivalneva M.N. Influence of microbial carbonate biomineralization on the strength of cement stone. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2024. No. 5. Pp. 24–33. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-5-24-33