

УДК 666.973.2

**МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОРКРЕТ-БЕТОНА
С РЕГЕНЕРИРОВАННЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ ИЗ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ**

Г. Кюлекчи¹, М. Чуллу², А. О. Йилмаз²

¹Университет Гюмюшхане,

E-mail: gkulekci@gumushane.edu.tr, 29100, г. Гюмюшхане, Турция

²Технический университет Карадениз,

E-mail: aoyilmaz@ktu.edu.tr, 61080, г. Трабзон, Турция

Рассмотрена возможность применения строительных отходов, измельченных до требуемых фракций, в качестве заполнителя для торкрет-бетона. Проведены прочностные испытания цилиндрических образцов и плит с полимерными волокнами. Отмечается, что с увеличением доли регенерированного заполнителя прочность на одноосное сжатие цилиндрических образцов снижается на 10–30 %, при этом скорость ультразвуковых волн увеличивается. Зафиксировано увеличение ударной вязкости в образцах бетона, приготовленных путем замены природного заполнителя на 50 % регенерированным заполнителем с использованием дополнительно полимерных волокон. Выявлено, что данные заполнители в торкрет-бетоне положительно взаимодействуют с полимерным волокном и могут служить альтернативой природным заполнителям с целью снижения загрязнения окружающей среды строительными отходами.

Строительные отходы, испытание плит, регенерированный заполнитель, торкрет-бетон, управление отходами

DOI: 10.15372/FTPRPI20230304

Торкрет-бетон состоит из смеси воды, цемента, заполнителей, химических добавок и наносится на поверхность набрызгиванием под определенным давлением через пневмошланг или пневмотрубу [1–4]. По сравнению с обычным бетоном он обладает большей прочностью, меньшим временем схватывания и периодом выдержки, применяется при ремонте зданий и сооружений, укреплении тоннелей, бортов карьеров, нефтегазовых скважин и других подземных сооружений [5–8].

Для определения механических свойств торкрет-бетона обычно проводятся исследования на балочках или плитах на изгиб. Использование плит для испытаний более точно показывает поведение волокон в торкрет-бетоне. Такие испытания выполняются путем нагружения центральной точки квадратной плиты, установленной на четырех опорах по краям [9]. Это наиболее надежный метод оценки поведения бетона после стадии трещинообразования. Жесткость образцов, усиленных волокнами, измеряется по кривой “нагрузка – прогиб”, анализируется способность волокон поглощать энергию. Несмотря на высокую эффективность оценки поведения после стадии трещинообразования бетона, усиленного волокнами, погло-

щение энергии во многом зависит от размера образца. Метод испытаний на плитах приближенно отражает механическое поведение бетона по сравнению с другими лабораторными испытаниями [10–12].

В научной литературе изучено влияние волокон и цементных добавок на свойства торкрет-бетона, а заполнитель с этой точки зрения рассмотрен ограниченно. Например, для перлита, используемого вместо мелкого заполнителя при приготовлении бетонной смеси, требуется большее количество воды [13]. В [14] для приготовления торкрет-бетона применяются регенерированные заполнители (РЗ). При испытаниях цилиндрических образцов определялись прочность на одноосное сжатие, прочность на растяжение, скорость ультразвуковых волн, модуль упругости и стойкость на истирание, однако жесткость и поглощение энергии при прогибе не изучались.

Рост городского населения и влияние катастрофических явлений природы приводят к трансформации городской среды и сносу устаревших зданий. Строительные отходы негативно воздействуют на окружающую среду, что влияет на экономику и экологию данных территорий [15]. В [16–21] рассматриваются регенерированные заполнители из строительных отходов вместо природных. Они применяются в различных типах бетона [20–25].

Технология нанесения торкрет-бетона широко распространена в горнодобывающей и строительной промышленности. Укрепление подземных выработок требует значительного объема его производства и потребления [13, 22, 26, 27]. В Северной Америке ежегодное потребление торкрет-бетона оценивается в 200 тыс. м³, ~60 % на 1 м³ приходится на заполнитель, т. е. в среднем потребляется 300 т заполнителя [28]. Учитывая скорость истощения природных ресурсов, это достаточно высокий показатель.

Работы [3, 8, 12, 25] посвящены влиянию заполнителей на характеристики торкрет-бетона. В [14] РЗ использовались на образцах в виде цилиндра и балки, испытание плит методом EFNARC не проводилось.

Цель настоящей работы — анализ применения регенерированных заполнителей из строительных отходов в торкрет-бетоне и их взаимодействие с полимерными волокнами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В горном деле и строительстве торкрет-бетон применяется для укрепления разных поверхностей, так как он обладает высокой прочностью при малом периоде выдержки и низком коэффициенте пористости. На его прочностные характеристики влияет пропорция связующего вещества и взаимодействие с заполнителем. Полимерные волокна увеличивают поглощаемую энергию при прогибе, повышают несущую способность торкрет-бетона. Для изучения взаимодействия волокон с РЗ образцы готовились с разным содержанием волокон. В качестве заполнителя использовались строительные отходы, полученные при сносе зданий. В бетонной смеси применялся известняк, цемент, полимерное волокно, ускоритель схватывания и пластификатор. Строительные отходы подвергались двухстадийному дроблению и просеиванию. После первой стадии дробления их размер не превышал 50 мм, после второй — получен РЗ с фракциями 0–4 и 4–8 мм. Контрольные образцы содержали природный заполнитель (известняк) с фракциями 0–4 и 4–8 мм. Связующее вещество — цемент класса CEM I 42.5 R (TSEN 197-1). Химические свойства цемента, %: SiO₂ — 18.59, Al₂O₃ — 4.69, Fe₂O₃ — 3.04, MgO — 1.92, CaO — 60.34, Na₂O — 0.11, K₂O — 0.64, потери при прокаливании — 7.19. Физические свойства цемента следующие: удельный вес 3.05 г/см³; удельная площадь поверхности 4145 см²/г; температура кальцинации 800–1000 °С.

Добавление полимерных волокон в торкрет-бетон является распространенной практикой, так как это увеличивает способность бетона поглощать энергию в процессе подземных горнодобывающих мероприятий. В данном испытании содержание полимерных волокон составляло 2 и 6 кг на 1 м³ бетонной смеси. Их технические свойства: материал — полипропилен; форма — волнообразная; длина — 54 мм; количество — 220 тыс. ед./кг. Для ускорения схватывания и регулировки консистенции смеси в образцах использовался ускоритель схватывания (8 % от общего веса цемента) и пластификатор (1 % от веса цемента). В табл. 1 приведены технические характеристики химических добавок.

ТАБЛИЦА 1. Технические характеристики химических добавок

Показатель	Химическая добавка	
	Master Glenium TC 1500	Master Roc SA 160
Химическая функция	Пластификатор	Ускоритель схватывания
Форма отпуска	Вязкая жидкость	Жидкость
Цвет	Темно-коричневый	Бежевый
Плотность (при + 20 °C), кг/л	1.084	1.440
pH	4.0	2.5
Содержание хлора / щелочи, %	< 0.01 / < 3	< 1 / —
Оксид свинца	Высокая коагуляция	Высокая эффективность
Химическая основа	Эфир поликарбоксилата	Не содержит щелочи

Применение регенерированных заполнителей в торкрет-бетоне и исследование их взаимодействия с полимерными волокнами изучено двумя методами. В первом изготовлены цилиндрические образцы 100 × 200 мм и регистрировались изменения их механических свойств на протяжении продолжительного периода выдержки. Подготовленные образцы испытывались на усадку. При коротком (3, 7, 14, 28 сут) и продолжительном (56, 90, 180, 270 сут) периодах выдержки измерялись их прочности на одноосное сжатие и скорости ультразвуковых волн. В исследовании по второму методу образцы имели форму плит 600 × 600 × 100 мм, в раствор добавлялись полимерные волокна. Методом испытания плит EFNARC, разработанным Европейской Федерацией национальных ассоциаций для изучения поведения разных типов бетона путем определения диапазона деформации при максимальной нагрузке, измерялся прогиб плиты и поглощаемая энергия, определялась ее несущая способность.

Прочностные свойства торкрет-бетона наиболее показательны. Прочность цилиндрических образцов с РЗ на одноосное сжатие испытывалась для определения их класса прочности. В соответствии со стандартом ASTM C-42 подготовлено 72 образца размером 100 × 200 мм и содержанием РЗ 50 и 100 % (табл. 2). Образцы испытывались с выдержкой 3, 7, 14, 28, 56, 90, 180 и 270 сут с помощью 200-тонной нагрузочной установки.

ТАБЛИЦА 2. Соотношения приготовления смесей торкрет-бетона [29]

Тип заполнителя	Соотношение заполнителя, %	Химическая добавка	Содержание, %		Период выдержки, сут	
			химических добавок в объеме цемента	связующего вещества	короткий	продолжительный
GKA / DA	100 / 0	РН – АК	8 – 1	7	3, 7, 14, 28	56, 90, 180, 270
GKA / DA	50 / 50					
GKA / DA	0 / 100					

Примечание. GKA — регенерированный заполнитель; DA — природный заполнитель (известняк); РН — ускоритель схватывания; АК — пластификатор.

Изучалось воздействие регенерированного заполнителя в составе торкрет-бетона на геотехнические свойства, такие как коэффициент пористости и прочность бетона на сжатие и растяжение. Для этого в соответствии со стандартами ASTM C 597 (ASTM C 597-09, 2009) измерялись скорости ультразвуковых волн в цилиндрических образцах после соответствующего периода выдержки и просушки в течение 24 ч.

Влияние волокон, добавленных в бетон, исследовалось при испытаниях разрушения плит. Волокна в бетоне поглощают часть энергии за счет деформации без разрушения. Область под кривой “нагрузка – деформация” определяет способность поглощения энергии (жесткость). На рис. 1 плита размером $600 \times 600 \times 100$ мм установлена на четырех опорах по краям, к центру ее тяжести прикладывается усилие $P = 400$ кН с контактной площадью 100×100 мм.

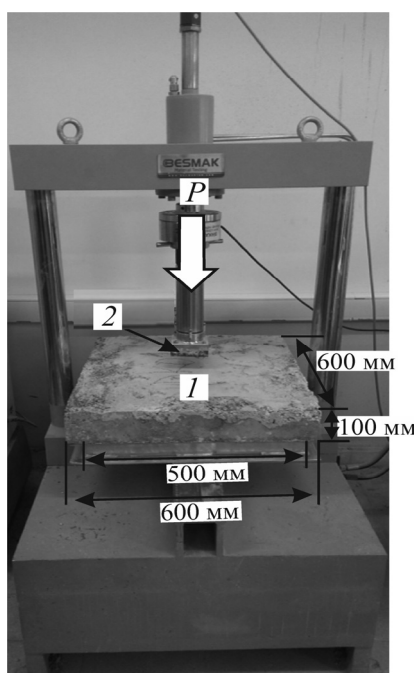


Рис. 1. Испытание плиты методом EFNARC: 1 — образец торкрет-бетона в виде плиты; 2 — стальная пластина 100×100 мм

С целью исследования применения регенерированного заполнителя вместо природного и оценки влияния полимерных волокон на жесткость плиты для испытаний по методу EFNARC из торкрет-бетона изготавливались плиты с 50 и 100 % долями РЗ (табл. 3).

ТАБЛИЦА 3. Пропорции приготовления смесей торкрет-бетона, усиленного полимерными волокнами (выдержка 28 сут)

Образец плиты	Заполнитель	Доля заполнителя, %	Материал волокна	Количество волокна, кг/м ³
100GKA	GKA	100	—	—
50GKA	GKA / DA	50 / 50	—	—
100DA	DA	100	—	—
2GPL	GKA	100	Полипропилен	2
6GPL	GKA	100	Полипропилен	6
Контрольный	DA	100	Полипропилен	2

Примечание. GKA — регенерированный заполнитель; DA — природный (известняк).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Испытания проводились на цилиндрических образцах размером 100×200 мм и плитах $600 \times 600 \times 100$ мм. После выдержки 3, 7, 14, 28, 56, 90, 180 и 270 сут методом EFNARC определялись прочность цилиндрических образцов на одноосное сжатие и скорость ультразвуковых волн, а также зависимость между поглощаемой энергией и прогибом плиты.

Образцы с содержанием природного заполнителя 100 % выступали контрольными, с ними сравнивались образцы 50GKA и 100GKA. Прочность на одноосное сжатие контрольных образцов спустя 3 сут выдержки составила 5.42 МПа, после 270 сут — 19.16 МПа (рис. 2). Образцы 100GKA к концу выдержки 3 сут имели прочность 5.37 МПа, после 270 сут — 13.03 МПа (рост на 59 %). Спустя 28 сут прочность контрольных образцов увеличилась на 61 %, прочность образцов с РЗ — на 52 %. К концу короткого периода выдержки (28 сут) разница прочности между образцами составляла 19 %, к концу продолжительного (270 сут) — увеличилась до 31 % (6.13 МПа).

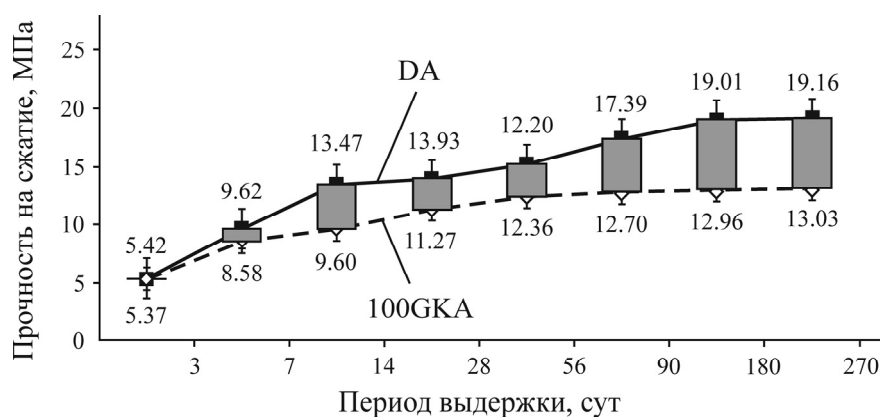


Рис. 2. Соотношение прочности между контрольным образцом из природного заполнителя (DA) и образцом 100GKA

В [14] получены похожие результаты прочности на одноосное сжатие спустя 56 сут выдержки и установлено, что прочность повышается быстрее в короткий период, после 28 сут — процесс замедляется. Это связано с тем, что новый цемент в смеси активно реагирует с водой и образует прочную связь. При уменьшении количества нового цемента в смеси скорость набора прочности замедляется, т. е. наличие старого цемента в РЗ и покрытие частиц заполнителя — причина низкой скорости набора прочности по сравнению с природным заполнителем.

Прочность цилиндрических образцов, содержащих РЗ в количестве 0, 50, 100 %, в среднем увеличилась на 46 % за короткий период выдержки (3, 7, 14, 28 сут) и с замедлением повышалась в течение продолжительного времени. К концу 28 сут прочность образцов 50GKA составила 11.32 МПа, 100GKA — 11.28 МПа, после 270 сут у образцов 100GKA она уменьшилась на 9 % по сравнению с образцами 50GKA (рис. 3). Прочность образцов уменьшается с увеличением содержания регенерированного заполнителя вместо природного, так как поверхность частиц заполнителя покрыта остатками старого цемента, а в заполнителе существуют микротрещины, образовавшиеся до и во время его производства (рис. 4). Из-за абсорбции требуется большое количество воды при высоком содержании регенерированного заполнителя, что негативно влияет на прочность [4, 14, 18].

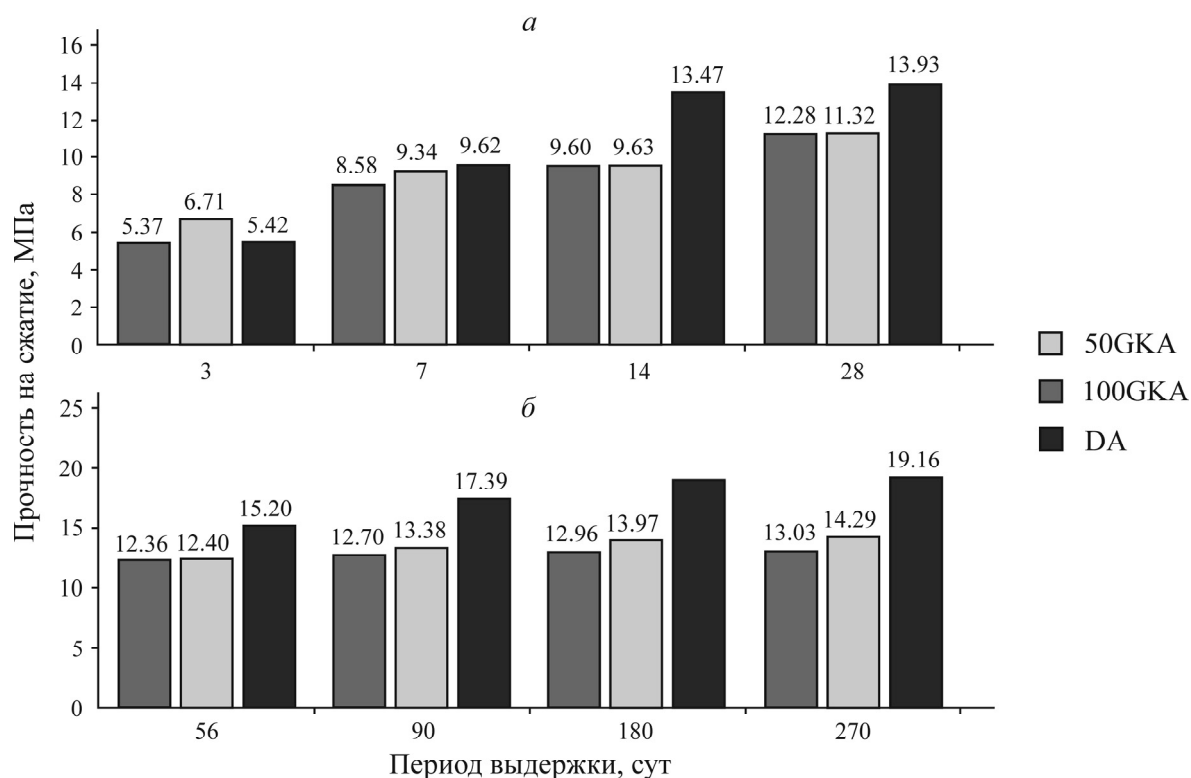


Рис. 3. Прочность образцов с природным заполнителем (DA) и образцов 50GKA, 100GKA в течение короткого (а) и продолжительного (б) периодов выдержки

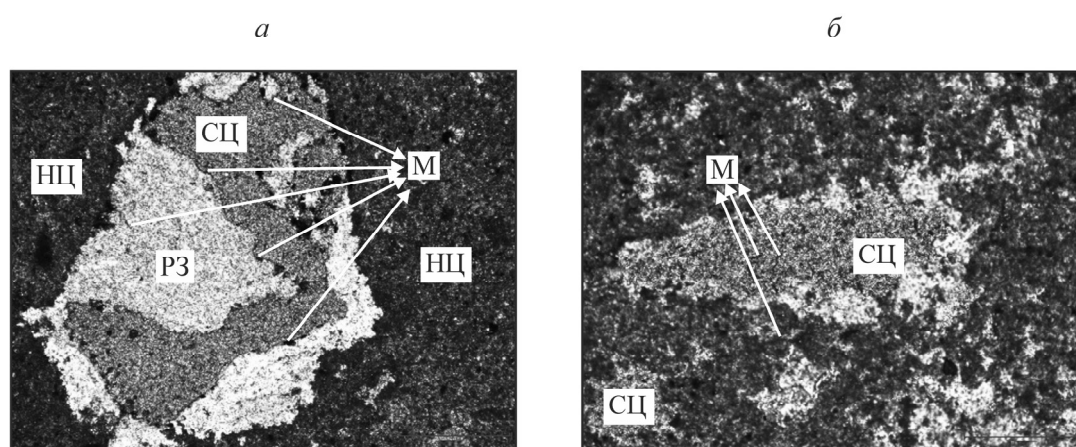


Рис. 4. Частицы старого цемента (СЦ) и микротрещины (М), окружающие поверхность регенерированного заполнителя (РЗ); НЦ — новый цемент

Полученные прочности образцов на одноосное сжатие классифицировались согласно стандарту TSEN 206:2013 + A1 (табл. 4). Цилиндрические образцы, изготовленные с РЗ, соответствуют классу прочности С8/10, образцы с природным заполнителем — С12/15. Класс прочности торкрет-бетона с регенерированным заполнителем не соответствует классу прочности торкрет-бетона с природным заполнителем, несмотря на небольшую разницу в прочности. Основная причина низкого класса прочности цилиндрических образцов — низкий класс прочности РЗ, полученных из строительных отходов. В [30] отмечается, что с увеличением количества РЗ прочность бетона уменьшается.

ТАБЛИЦА 4. Классификация прочности бетона

Класс прочности бетона цилиндр/куб	Минимальная прочность на сжатие спустя 28 сут выдержки, МПа		DA	50GKA	100GKA
	Цилиндр	Куб			
C8/10	8	10	—	C8/10	C8/10
C12/15	12	15	C12/15	—	—
C16/20	16	20	—	—	—

В научной литературе применение регенерированного заполнителя в торкрет-бетоне недостаточно исследовано. Согласно [31–33], с увеличением РЗ прочность обычного бетона снижается. В [34] отмечается снижение прочности на сжатие на 10 %, в [35] также зафиксировано ее снижение, однако прочность бетона при использовании РЗ сопоставима с прочностью при использовании природного заполнителя. В [36] рассмотрены прочностные свойства асфальтовой смеси с добавлением строительных отходов и выявлено, что с увеличением РЗ прочностные свойства увеличиваются.

В среднем прочность торкрет-бетона после выдержки 7 сут составила 25–30 МПа, после 28 сут — 35–40 МПа. На рис. 5 показано увеличение прочности торкрет-бетона на сжатие с 50 % РЗ в зависимости от выдержки.

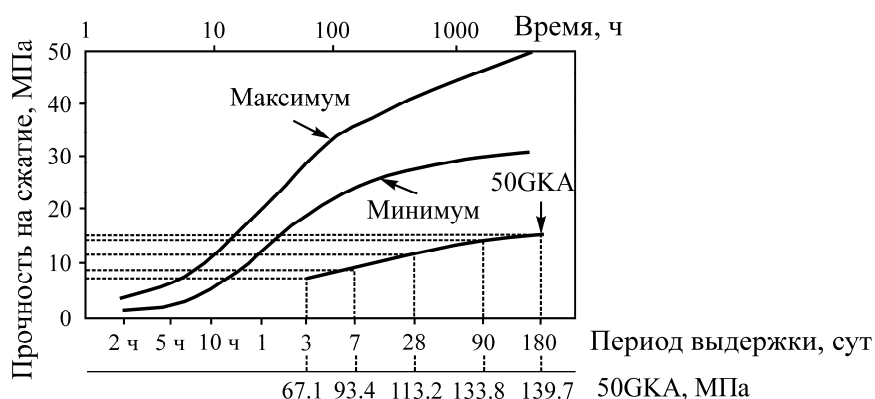


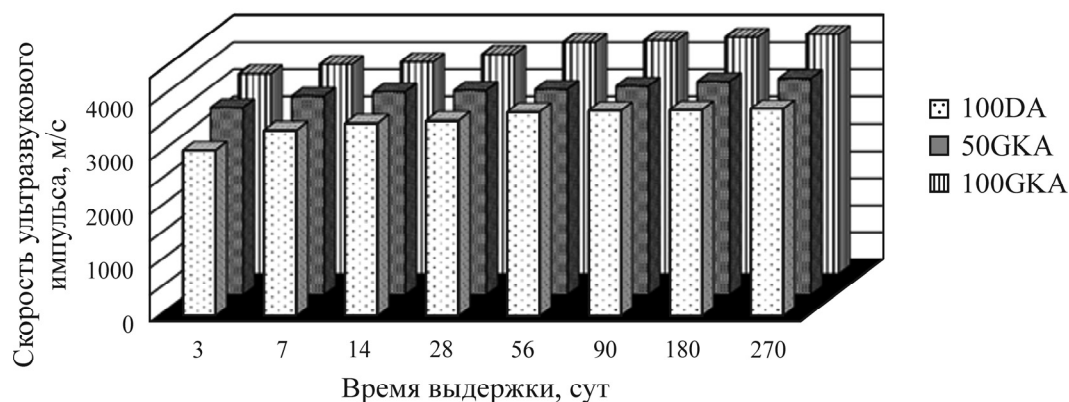
Рис. 5. Изменение давления сопротивления образца 50GKA в течение времени [37]

Скорость ультразвуковых волн (УЗ-волн) измерялась для оценки коэффициента пористости и прочностных свойств цилиндрических образцов. С увеличением РЗ скорость УЗ-волн повышается, к концу продолжительного периода выдержки при доли РЗ 100 % составила 4420 м/с. В образцах торкрет-бетона с природным заполнителем она не превысила значения образцов с регенерированным заполнителем (табл. 5).

ТАБЛИЦА 5. Скорость УЗ-волн в зависимости от периода выдержки бетона, м/с

Образец	Соотношение заполнителя	Период выдержки, сут							
		3	7	14	28	56	90	180	270
100DA	100 % DA	3061	3430	3554	3605	3762	3851	3794	3812
100GKA	100 % РЗ	3692	3863	3909	4049	4271	4304	4366	4420
50GKA	50 % РЗ	3375	3713	3840	3767	3788	3848	3932	3988

За короткий период выдержки скорость УЗ-волн увеличивалась с повышением доли РЗ: 0, 50 и 100 % в среднем на 9 %. В продолжительном периоде наблюдался ее замедленный рост: после 270 сут для 100GKA — на 24.5 %, для 50GKA — на 15.6 % (рис. 6).



100DA	3061.5	3430.2	3553.6	3605.1	3761.8	3779.7	3794.1	3812.3
50GKA	3450.1	3661.7	3741.7	3766.7	3788.5	3847.7	3932.1	3987.9
100GKA	3691.7	3863.4	3909.2	4049.1	4270.9	4304.3	4366.0	4419.6

Рис. 6. Влияние содержания РЗ на скорость УЗ-волн с увеличением периода выдержки для образцов с природным заполнителем 100 % (DA), а также 50GKA, 100GKA

Основная причина высокой скорости УЗ-волн в образцах 100GKA состоит в том, что частицы старого бетона в заполнителе создают полости [14]. С увеличением РЗ повышается пористость бетона и, как следствие, скорость УЗ-волн на 6–7 % согласно испытаниям [38]. Однако в силу того, что использование РЗ в торкрет-бетоне недостаточно распространено, анализ скорости УЗ-волн нельзя признать полностью достоверным.

Исследование цилиндрических образцов торкрет-бетона с регенерированным заполнителем выявило прямую пропорциональную зависимость между прочностью на одноосное сжатие и скоростью УЗ-волн (рис. 7). Наибольший коэффициент корреляции зафиксирован для 50GKA, наименьший — для 100GKA.

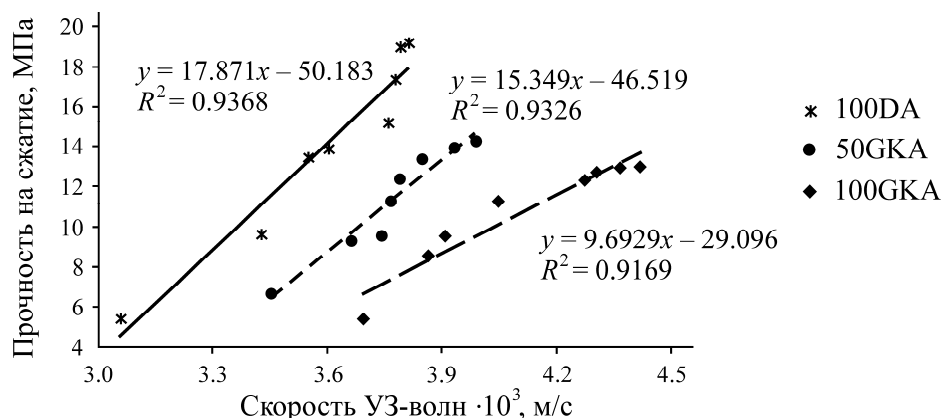


Рис. 7. Зависимость между прочностью на сжатие и скоростью УЗ-волн

Для испытания методом EFNARC подготовлено пять разных смесей с РЗ и 15 плит размером $600 \times 600 \times 100$ мм для каждой смеси. Измерялась поглощаемая энергия плитой при нагружении, а также скорость УЗ-волн в плитах. Исследование прекращалось, когда плиты разрушались при наибольшей точечной нагрузке. На рис. 8 показано разрушение на четыре части плиты с РЗ.

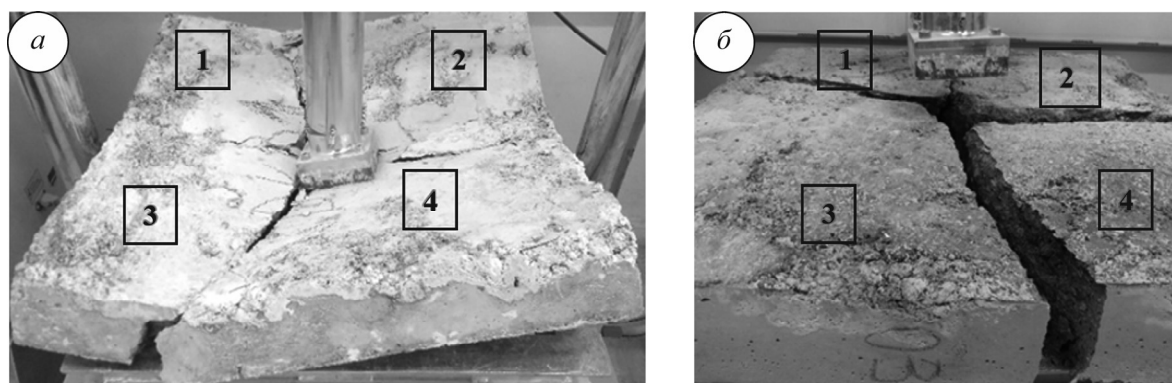


Рис. 8. Типовое разрушение плиты при испытаниях методом EFNARC: *а* — плита, усиленная волокнами; *б* — контрольная плита. Цифрами обозначены части разрушения

По результатам испытаний плит 50GKA и 100GKA построены кривые “нагрузка – прогиб”, “поглощение энергии – прогиб”, которые получены путем вычисления площади под ними (рис. 9). Контрольные образцы из природного заполнителя (100DA) разрушились, показав прогиб 4.38 мм при максимальной нагрузке 27.31 кН. Выявлено, что максимальная разрывная нагрузка была выше, но прогиб уменьшился в плитах с РЗ. Наименьший прогиб составил 2.80 мм для образца 100GKA без волокна. При отклонении 2.5 мм образец 100DA поглощал 0.22 Дж энергии, 100GKA — 13.57 Дж. Плиты 50GKA поглощали на 9.32 Дж больше, чем 100DA, при отклонении 2.5 мм и на 34 % меньше энергии, чем 100GKA. Образцы 50GKA поглощали наибольшую энергию при отклонении на 3.53 мм (29.40 Дж).

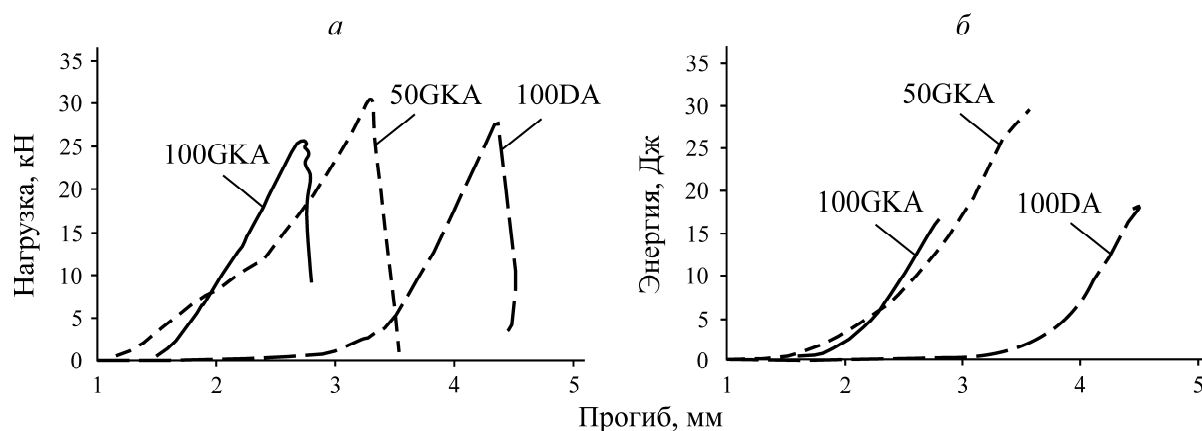


Рис. 9. Соотношение между прогибом плиты, прилагаемой нагрузкой (*а*) и поглощаемой энергией (*б*) для образцов 100DA, 50GKA и 100GKA

Ударная вязкость (максимальная энергия, поглощаемая при разрушении) бетона без добавления волокон считается низкой. При сравнении плит, содержащих РЗ, с контрольными видно, что ударная вязкость плит, изготовленных путем замены природного заполнителя на 50 %, увеличивается, а при большем количестве РЗ — снижается так же, как у образцов с природным заполнителем. Неволокнистый бетон имеет жесткую структуру, максимальный прогиб такой плиты составляет 4.5 мм, основной источник деформации — цемент [13, 25, 39]. Прогиб значительно меньше в бетонах, содержащих РЗ. Старый цемент, покрывающий поверхность заполнителя, препятствует связующим свойствам нового цемента, уменьшая его взаимодействие

с РЗ. Поскольку воды в смеси недостаточно для гидратации из-за высоких показателей водопоглощения РЗ, общая прочность снижается. Кроме того, в плитах, изготовленных с долей РЗ 50 %, старый цемент крошится во время смешивания и оказывает эффект заполнителя, повышая прочность за счет заполнения пустот.

В экспериментах на 1 м^3 бетонной смеси добавляли 2 (2GPL) и 6 кг (6GPL) полипропилена и сравнивали взаимодействие волокон с РЗ с контрольными образцами Ref (2 кг/м^3 волокон с известняком в качестве наполнителя). Обнаружено, что ударная вязкость плиты повышалась с увеличением содержания волокон. Ударная вязкость плит 6GPL составила 581.27 Дж, пластины 2GPL на 61 % меньше поглощают энергию (рис. 10). Ударная вязкость контрольных образцов, усиленных полимерными волокнами с содержанием 2 кг/м^3 , выше, чем у плит, изготовленных с РЗ при таком же количестве волокон.

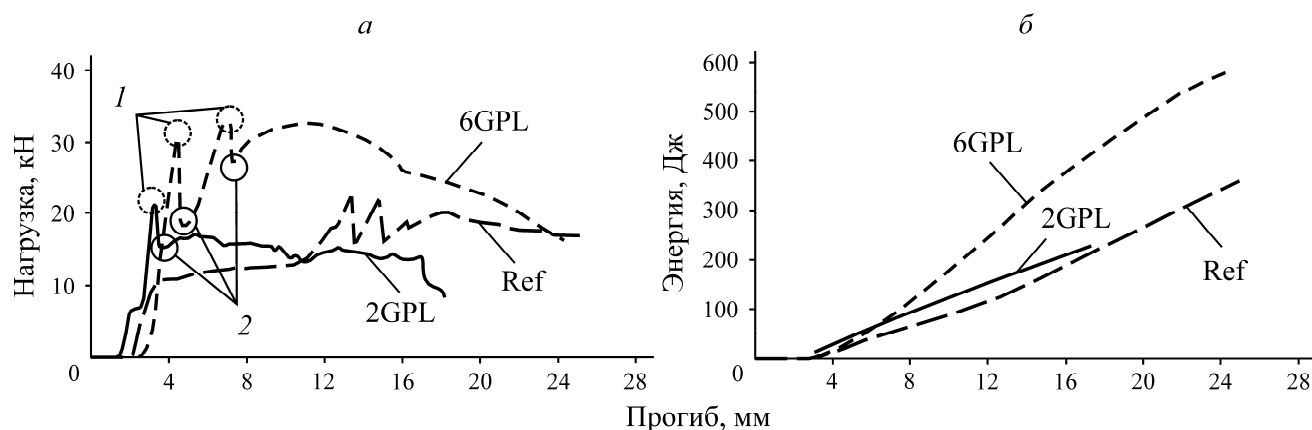


Рис. 10. Влияние количества волокон из полипропилена на нагрузку (а) и ударную вязкость (б) в зависимости от прогиба плит: 2GPL, 6GPL — образцы с 2 и 6 кг волокон на 1 м^3 и РЗ 100 % соответственно; Ref — контрольный образец (2 кг волокон с 100DA); 1 — первый пик разрушения; 2 — упрочняющее влияние волокон на нагрузку

При испытании плит методом EFNARC критерий оценки прочности бетона — класс энергопоглощения [40]. Согласно классификации жесткости по значениям поглощаемой энергии при прогибе 25 мм (метод EFNARC), классу А соответствует 500 Дж, В — 700, С — 1000 Дж [4]. В табл. 6 приведены первые пиковые нагрузки, максимальные нагрузки и поглощаемая энергия в результате испытаний плит из торкрет-бетона с РЗ и полимерными волокнами методом EFNARC при прогибе 25 мм.

ТАБЛИЦА 6. Сравнение средних значений нагрузки первого пика, максимальной нагрузки и поглощения энергии

Образец	Первая пиковая нагрузка, кН	Максимальная нагрузка, кН	Поглощение энергии, Дж	Класс жесткости
2GPL	17.88	17.88	0	—
6GPL	30.67	33.07	580	В
Ref	22.14	22.02	360	А

Из табл. 6 и рис. 10 видно, что при прогибе 17 мм ударная вязкость образца 2GPL составляет 225 Дж, контрольного — 220 Дж. Плиты с РЗ разрушались после прогиба 17 мм, так как остатки цемента на поверхности РЗ не смогли взаимодействовать с достаточным количеством

волокон в смеси. Образцы 6GPL — плиты с наибольшей способностью поглощать энергию. Первый пик их деформации наблюдался при 30.67 кН, после того как плиты разрушались в короткий период времени, волокна воспринимали нагрузку. Второй пик имел место при деформации 25 мм, где поглощено 580 Дж (в 16 раз больше контрольного образца).

Энергопоглощающая способность при деформации 17 мм и ударная вязкость торкрет-бетона, изготовленного из РЗ с содержанием волокон 2 кг/м^3 , была выше, чем у контрольного образца. Плиты из РЗ с содержанием волокон 6 кг/м^3 также обладали более высокой прочностью, чем контрольный (деформация 25 мм). Следовательно, регенерированный заполнитель целесообразно использовать в составе торкрет-бетона, а его взаимодействие с полимерными волокнами можно признать положительным (рис. 11). Пластичность и ударная вязкость усиленного волокном бетона значительно выше, чем у бетона без волокон. В таком бетоне содержание волокон — важный фактор, влияющий на свойства бетона.

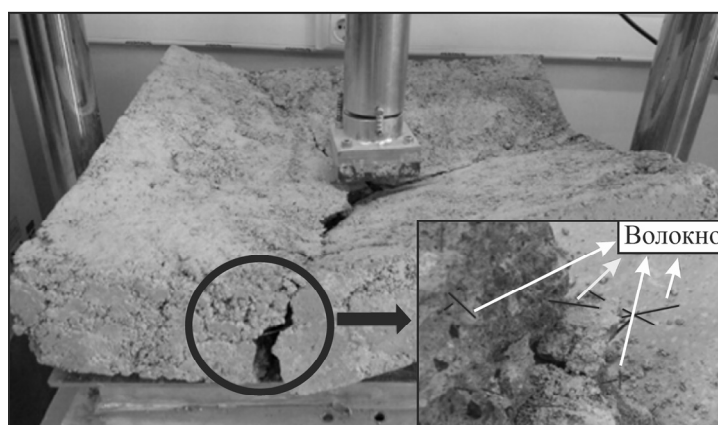


Рис. 11. Использование полимерных волокон в торкрет-бетоне с регенерированным заполнителем из строительных отходов

ВЫВОДЫ

Испытание образцов торкрет-бетона с регенерированным заполнителем показало, что плиты, не содержащие полимерные волокна, разрушаются непосредственно после первого пика разрушения, в то время как усиленный волокнами бетон продолжает деформироваться после первой нагрузки и сохраняет свои несущие свойства. Микротрещины в бетоне, не усиленном волокнами, вызывают прямое разрушение в нем. Максимальная деформация бетона с волокнами при растрескивании значительно увеличивается по сравнению с любым неволокнистым бетоном. После максимальной нагрузки в бетонах, усиленных волокнами, скорость уменьшения нагрузки намного медленнее, чем в обычных бетонах, из-за повышенной деформации. Следовательно, энергия, поглощаемая в результате отделения и удлинения волокон от матрицы, довольно высокая в бетоне, усиленном волокнами.

Регенерированный заполнитель может использоваться в торкрет-бетоне вместо природного или вместе с ним. Виды торкрет-бетона, произведенные с использованием регенерированного заполнителя, относятся к классу легких и могут применяться в облицовке тоннелей и служить закладочным материалом. Использование регенерированных заполнителей и полимерных волокон в торкрет-бетоне положительно влияет на его свойства. Энергопоглощающая способ-

ность плит, изготовленных из регенерированного заполнителя с содержанием волокон 6 кг/м^3 , соответствует классу В при прогибе 25 мм, их можно использовать при ремонте тоннелей. Заполнитель, полученный из строительных отходов, может использоваться в отраслях горнодобывающей промышленности и строительства. Таким образом будет сокращено потребление природного заполнителя, уменьшен ущерб, наносимый строительными отходами окружающей среде, а также внесен значительный вклад в переработку отходов.

Авторы работы выражают благодарность студентам кафедры гражданского строительства факультета естественных и прикладных наук Государственного университета Гюмюшхане за содействие в лабораторных исследованиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Hemphill G. B.** Practical tunnel construction, Hoboken, NJ, USA, John Wiley & Sons, Inc., 2012.
2. **Won J. P., Hwang U. J., Kim C. K., and Lee S. J.** Mechanical performance of shotcrete made with a high-strength cement-based mineral accelerator, *Constr. Build. Mater.*, 2013, Vol. 49. — P. 175–183.
3. **Külekçi G.** Effect of different synthetic fiber using shotcrete on ultrasonic pulse velocity, *Int. Undergr. Excav. Symp.*, 2018. — P. 493–499.
4. **Külekçi G.** Comparison of field and laboratory result of fiber reinforced shotcrete application, *Period Polytech. Civ. Eng.*, 2021, Vol. 65. — P. 463–473.
5. **Decker J., Madsen P., Gall V., and O'Brien T.** Use of synthetic, fiber-reinforced, initial shotcrete lining at Devil's slide tunnel project in California, *Transp. Res. Rec.*, 2012. — P. 147–154.
6. **Külekçi G. and Yılmaz A. O.** Classification of rock and support applications far tunneling, *Sample of Environmental Road in Gümüşhane*, *Proc. 4th Int. Undergr. Excav. Symp.*, 2016. — P. 535–540.
7. **Külekçi G., Kesimal A., Yılmaz T., and Deniz A.** Investigation of shotcrete support in gümüşhane mastra gold mine, *Ulus. Kırmataş Sempozyurnu*, 2015. — P. 221–229.
8. **Külekçi G. and Çullu M.** The Investigation of mechanical properties of polypropylene fiber-reinforced composites produced with the use of alternative wastes, *J. Polytech.*, 2021. — 777832.
9. **Cengiz O. and Turanli L.** Comparative evaluation of steel mesh, steel fibre and high-performance polypropylene fibre reinforced shotcrete in panel test, *Cem. Concr. Res.*, 2004, Vol. 34. — P. 1357–1364.
10. **Ylmén R., Jäglid U., Steenari B.-M., and Panas I.** Early hydration and setting of Portland cement monitored by IR, SEM and Vicat techniques, *Cem. Concr. Res.*, 2009, Vol. 39. — P. 433–439.
11. **Zeng Q., Li K., Fen-chong T., and Dangla P.** Pore structure characterization of cement pastes blended with high-volume fly-ash, *Cem. Concr. Res.*, 2012, Vol. 42. — P. 194–204.
12. **Külekçi G.** Slake durability of the volcanites of artvin region, *Int. Conf. Civ. Environ. Geol. Min. Eng.*, 2019. — P. 1132–1139.
13. **Liu W. V. and Apel D. B.** Bindiganavile VS. Thermal properties of lightweight dry-mix shotcrete containing expanded perlite aggregate, *Cem. Concr. Compos.*, 2014, Vol. 53. — P. 44–51.
14. **Duarte G., Bravo M., de Brito J., and Nobre J.** Mechanical performance of shotcrete produced with recycled coarse aggregates from concrete, *Constr. Build. Mater.*, 2019, Vol. 210. — P. 696–708.
15. **Leung C. K. Y., Lai R., and Lee A. Y. F.** Properties of wet-mixed fiber reinforced shotcrete and fiber reinforced concrete with similar composition, *Cem. Concr. Res.*, 2005, Vol. 35. — P. 788–795.

16. **Bravo M., De Brito J., Pontes J., and Evangelista L.** Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants, *Constr. Build. Mater.*, 2015, Vol. 77. — P. 357–369.
17. **Mália M., de Brito J., Pinheiro M. D., and Bravo M.** Construction and demolition waste indicators, *Waste Manag. Res. J. Sustain Circ. Econ.*, 2013, Vol. 31. — P. 241–255.
18. **Bai G., Zhu C., Liu C., and Liu B.** An evaluation of the recycled aggregate characteristics and the recycled aggregate concrete mechanical properties, *Constr. Build. Mater.*, 2020, Vol. 240. — 117978.
19. **Elansary A. A., Ashmawy M. M., and Abdalla H. A.** Effect of recycled coarse aggregate on physical and mechanical properties of concrete, *Adv. Struct. Eng.*, 2021, Vol. 24. — P. 583–595.
20. **Li J. T., Chen Z. P., Xu J. J., Jing C. G., and Xue J. Y.** Cyclic behavior of concrete-filled steel tubular column–reinforced concrete beam frames incorporating 100 % recycled concrete aggregates, *Adv. Struct. Eng.*, 2018, Vol. 21. — P. 1802–1814.
21. **Zhang H. and Zhao Y.** Performance of recycled aggregate concrete in a real project, *Adv. Struct. Eng.*, 2014, Vol. 17. — P. 895–906.
22. **Wang Y., Deng Z., Xiao J., and Sheng J.** Mechanical properties of recycled aggregate concrete under multiaxial compression, *Adv. Struct. Eng.*, 2020, Vol. 23. — P. 2529–2538.
23. **Külekçi G. and Yılmaz A. O.** Use of recycled aggregate from construction wastes in mining methods, *Int. Particip. Cappadocia Geosci. Symp.*, 2018. — P. 212–217.
24. **Külekçi G.** Investigation of the utilization areas of construction and demolition wastes in the Black Sea region instead of aggregate and their areas of usage in the mining industry, *Karadeniz Technical. Universty*, 2018.
25. **Külekçi G., Yılmaz A. O., and Cullu M.** Experimental investigation of usability of construction waste as aggregates, *J. Min. Env.*, 2021, Vol. 12. — P. 63–76.
26. **Abou-Zeid Mohamed M. N. and Elkhidir E. M.** Influence of key parameters on quality of dry-mix shotcrete, *Transp. Res. Rec.*, 2002. — P. 51–55.
27. **Teymur P., Pala S., and Yuksel E.** Retrofitting of vulnerable reinforced concrete frames with wet-mixed shotcrete panels, *Adv. Struct. Eng.*, 2012, Vol. 15. — P. 1–14.
28. **Hooton R., Bernard E., and Pircher M.** The influence of thickness on performance of fiber-reinforced concrete in a round determinate panel test, *Cem. Concr. Aggregates*, 2001, Vol. 23. — P. 27.
29. **ASTM C42/C42M-20.** Standard test method for obtaining and testing drilled cores and sawed beams of Concrete, 2020.
30. **Silva R. V., De Brito J., and Dhir R. K.** Performance of cementitious renderings and masonry mortars containing recycled aggregates from construction and demolition wastes, *Constr. Build. Mater.*, 2016, Vol. 105. — P. 400–415.
31. **Ceia F., Raposo J., Guerra M., Júlio E., and de Brito J.** Shear strength of recycled aggregate concrete to natural aggregate concrete interfaces, *Constr. Build. Mater.*, 2016, Vol. 109. — P. 139–145.
32. **Ferreira L., de Brito J., and Barra M.** Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties, *Mag. Concr. Res.*, 2011, Vol. 63. — P. 617–627.
33. **Kou S. C. and Poon C. S.** Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate, *Constr. Build. Mater.*, 2012, Vol. 35. — P. 69–76.
34. **Cardoso R., Silva R. V., Brito J. de, and Dhir R.** Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review, *Waste Manag.*, 2016, Vol. 49. — P. 131–145.

- 35. Rakshvir M. and Barai S. V.** Studies on recycled aggregates-based concrete, *Waste Manag. Res. J. Sustain. Circ. Econ.*, 2006, Vol. 24. — P. 225–233.
- 36. Fatemi S. and Imaninasab R.** Performance evaluation of recycled asphalt mixtures by construction and demolition waste materials, *Constr. Build. Mater.*, 2016, Vol. 120. — P. 450–456.
- 37. Weaver J. M.** Geological factors significant in the assessment of rippability, *Civ. Eng. South Africa*, 1975, Vol. 17. — P. 313–316.
- 38. Soares D., de Brito J., Ferreira J., and Pacheco J.** Use of coarse recycled aggregates from precast concrete rejects: Mechanical and durability performance, *Constr. Build. Mater.*, 2014, Vol. 71. — P. 263–272.
- 39. Yang J. M., Kim J. K., and Yoo D. Y.** Performance of shotcrete containing amorphous fibers for tunnel applications, *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, 2017, Vol. 64. — P. 85–94.
- 40. Le Saoût G., Lothenbach B., Hori A., Higuchi T., and Winnefeld F.** Hydration of Portland cement with additions of calcium sulfoaluminates, *Cem. Concr. Res.*, 2013, Vol. 43. — P. 81–94.

Поступила в редакцию 11/XI 2021

После доработки 25/IV 2023

Принята к публикации 18/V 2023