



Научная статья  
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)  
УДК 620.22-419.8:678.686-047.40

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.03.040



## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ БЕТОНОВ, АРМИРОВАННЫХ ЧАСТИЦАМИ ВТОРИЧНО ПЕРЕРАБОТАННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Сергей Валерьевич Морозов <sup>1</sup>, Яна Михайловна Жумаканова <sup>2</sup>

<sup>1, 2</sup> Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия

<sup>1</sup> sergcska@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3850-3984>

<sup>2</sup> yana\_tsyam@mail.ru

**Аннотация.** В современном мире использование полимеров, включая композиционные материалы, стало неотъемлемой частью многих отраслей промышленности. Однако с ростом потребления полимеров возникают серьезные экологические проблемы, связанные с их переработкой и утилизацией. При переработке композиционных материалов перспективным является вторичное использование данных материалов и их применение в различных отраслях промышленности, например в строительстве. В данной работе проведены исследования влияния в качестве наполнителя измельченных композиционных материалов и их составляющих на физико-механические свойства бетонов. На первом этапе исследования был произведен выбор оптимального размера фракции армирующих частиц для наполнения бетонных образцов. Показано, что наилучшие физико-механические характеристики наблюдались при использовании мелкодисперсных частиц ввиду плохой адгезии крупнодисперсных частиц с цементной матрицей. После определения размера армирующих частиц были изготовлены в соответствии с ГОСТ бетонные образцы кубической формы с размерами 30/30/30 мм с различной степенью наполнения. Далее были проведены испытания армированных и стандартных бетонных образцов на сжатие. В результате испытаний выявлено, что предел прочности на сжатие бетонных образцов, армированных частицами измельченного стеклопластика (1 %) и частицами измельченного связующего ЭД-20 (10 %), увеличился в 2,6 раз, а модуль упругости – в 3–4 раза. На этом основании можно отметить, что использование добавок из измельченных композиционных материалов в качестве наполнителя бетонных композиций является перспективным и позволяет не только вторично перерабатывать данные материалы, но и с помощью их использования улучшать физико-механические свойства бетонов.

**Ключевые слова:** рециклинг композиционных материалов; физико-механические свойства бетонов; предел прочности на сжатие; модуль упругости; адгезия; композиционный материал; вторичное использование реактопластов.

**Для цитирования:** Морозов С. В., Жумаканова Я. М. Исследование свойств бетонов, армированных частицами вторичнопереработанных композиционных материалов // Ползуновский вестник. 2025. № 3, С. 229–233. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.03.040. EDN: <https://elibrary.ru/OWRASP>.

Original article

## STUDY OF PROPERTIES OF CONCRETE REINFORCED WITH PARTICLES OF RECYCLED COMPOSITE MATERIALS

Sergey V. Morozov <sup>1</sup>, Yana M. Zhumakanova <sup>2</sup>

<sup>1, 2</sup> Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

<sup>1</sup> sergcska@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3850-3984>

<sup>2</sup> yana\_tsyam@mail.ru

**Abstract.** In the modern world, the use of polymers, including composite materials, has become an integral part of many industries. However, with the growth of polymer consumption, serious environmental problems arise associated with their processing and disposal. When processing composite materials, the secondary use of these materials and their application in various industries, such as construction, is promising. In this paper, studies were conducted on the influence of crushed composite materials and their components as a filler on the physical and mechanical properties of concrete. At the first stage of the study, the optimal size of the fraction of reinforcing particles for filling concrete samples was selected. It was shown that the best physical and mechanical characteristics were observed when using fine particles, due to the poor adhesion of coarse particles with the cement matrix. After determining the size of the reinforcing particles, concrete samples of cubic shape with dimensions of 30/30/30 mm with different degrees of filling were manufactured in accordance with GOST. Then, tests of reinforced and standard concrete samples for compression were carried out. As a result of the tests, it was revealed that the compressive strength of concrete samples reinforced with particles of crushed fiberglass (1 %) and particles of crushed ED-20 binder (10 %) in-

© Морозов С. В., Жумаканова Я. М., 2025

*creased by 2,6 times, and the modulus of elasticity by 3-4 times. On this basis, it can be noted that the use of additives from crushed composite materials as a filler for concrete compositions is promising and allows not only to recycle these materials, but also to improve the physical and mechanical properties of concrete with their help.*

**Keywords:** *recycling of composite materials; physical and mechanical properties of concrete; compressive strength; modulus of elasticity; adhesion; composite material; secondary use of thermosets.*

**For citation:** Morozov, S.V. & Zhumakanova, Y.M. (2025). Study of the properties of concrete reinforced with particles of recycled composite materials. *Polzunovskiy vestnik*, (3), 229-233. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.03.040. EDN: <https://elibrary.ru/OWRAPSP>.

## ВВЕДЕНИЕ

Полимеры играют важнейшую роль в функционировании углеродного и кислородного циклов. В настоящее время в производство запущено множество синтетических материалов на основе полимеров, без которых уже невозможно представить жизнедеятельность человека [1–2].

Большую часть изделий из композиционных материалов изготавливают из реактопластов, представляющих собой полимерные материалы, которые в процессе производства формируются и затвердевают при помощи химических реакций. Они обладают высокой прочностью и устойчивостью к коррозии, что делает их идеальными для использования в различных отраслях промышленности, таких как авиастроение, автомобилестроение, электроника, строительство и др. [3–4]. Проблемой является то, что при изготовлении изделий из реактопластов образуется значительное количество технологических отходов (до 20 %), при этом высокие физико-механические свойства затрудняют утилизацию как этих отходов, остающихся в процессе производства, так и самих изделий из реактопластов после окончания их жизненного цикла.

В настоящее время рассматривают следующие методы утилизации полимерных композиционных материалов (ПКМ): захоронение на полигонах, физическая, термическая и химическая обработка. При традиционных методах утилизации, таких как захоронение и сжигание в окружающую среду, попадают множество вредных экологически опасных веществ, также они еще являются очень экономически невыгодными, поэтому данные методы не являются приоритетными.

В результате необходимо определиться с выбором оптимального метода утилизации полимерных композиционных материалов, который мы будем использовать в нашем исследовании.

Все методы утилизации полимерных композиционных материалов объединяет необходимость разрушения матрицы (связующего) с целью выделения армирующего наполнителя и получением на выходе различных продуктов переработки. В настоящее время условно рассматривают три метода утилизации: физические, химические и термические.

Основными перспективными физическими методами переработки в настоящее время являются механические и радиационные. К механическому методу относят измельчение, дробление и перетирание, основным продуктом которого является рециклат (продукт утилизации ПКМ) различной степени измельчения. Общий принцип радиационных методов основан на разрушении (деструкции) полимерной матрицы под действием высокоэнергетического излучения.

Главными достоинствами механических методов переработки являются сравнительная простота технологического оформления, универсальность – применим для любых ПКМ и полимеров, одновременная переработка волокон и полимерного связующего, а также отсутствие вредных выбросов и испа-

рений. К недостаткам механического способа следует отнести высокую энергоемкость, сложность регулирования размеров измельченных пластиков, не безвредное полимерное связующее, снижение механических свойств измельченных армированных пластиков, ограниченное вторичное применение переработанных материалов.

Преимуществом радиационного метода является его универсальность – под действием высокоэнергетического излучения разрушаются практически все полимерные связующие, а наполнитель остается неповрежденным (только для углеродных волокон). Недостатками метода являются излишняя радиационная нагрузка на окружающую среду и человека, утилизация преимущественно тонкослойных отходов армированных пластиков (до нескольких миллиметров).

Химические методы утилизации полимерных композиционных материалов основаны на деполимеризации (химическом разрушении) полимерного связующего, продуктом которых на выходе является волокно. В этом направлении основными перспективными методами являются термокатализ, сольволиз и окисление в псевдооживленном слое.

Преимущества данных методов являются: низкое энергопотребление, высокая селективность процесса по полимерным связующим (90–98 %) и сохранение свойств армированного наполнителя.

К основным недостаткам этих методов переработки можно отнести: сложность контроля технологического процесса переработки армированных пластиков с последующей утилизацией вредных реагентов и продуктов распада полимерной матрицы, сложность технологического оборудования из-за необходимости вести процесс при высоких давлениях (до 3,5 МПа, в отдельных случаях – до 29 МПа), а также селективность реагентов для деполимеризации связующего, т.е. для каждого утилизируемого связующего требуется подбирать состав исходных реагентов.

Из термических методов утилизации ПКМ в зависимости от содержания кислорода можно выделить газификацию (при недостатке кислорода) и пиролиз (отсутствие кислорода).

Метод газификации – это процесс разложения ПКМ с получением синтез-газа, который используют для производства тепловой и электрической энергии. Недостатком газификации является уничтожение наиболее ценных составляющих ПКМ и высокая вероятность выброса вредных газов в атмосферу.

В настоящее время самым распространенным термическим методом утилизации армированных пластиков является пиролиз. Пиролиз условно разделяют на низкотемпературный (от 300 до 500 °C), продуктами которого являются волокно, а также масла и твердые вещества – продукты распада полимерного связующего; среднетемпературный (от 500 до 800 °C), продуктами которого являются волокно, масла и газы, в меньшей степени – твердые вещества; высокотемпературный (от 800 до 1500 °C), основные про-

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ БЕТОНОВ, АРМИРОВАННЫХ ЧАСТИЦАМИ ВТОРИЧНО ПЕРЕРАБОТАННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

дукты – волокно и пиролизные газы, выход твердых веществ и масел незначителен. Процесс пиролиза проводится при отсутствии кислорода, часто в среде инертного газа – азота.

Преимуществами пиролиза являются высокий выход волокон при оптимизированном процессе, использование теплоты от разложения полимерного связующего, универсальность оборудования, хорошая адгезия эпоксидного связующего к переработанным волокнам армированного пластика и широкие возможности коммерческого применения. К недостаткам процесса следует отнести неравномерность прогрева рабочей зоны реактора и, как следствие, разложение связующего может быть неполным, а также необходимость обезвреживания пиролизных газов, которые содержат соединения опасных веществ [5].

В результате можно сделать вывод, что для максимального сохранения свойств выбранного наполнителя предпочтителен свой метод утилизации. Например, для углепластиков – это пиролиз и сольволиз, для стеклопластиков – это также пиролиз. Особенностью утилизации органопластиков является то, что наполнитель сравнительно близок по химическим и физическим свойствам к полимерной матрице, поэтому органический наполнитель разрушается практически одновременно с полимерной матрицей.

Также необходимо отметить, что в сравнении с добытым волокном из композитов и первичными волокнами существует потеря ими физико-механических характеристик порядка 20–50 %, и на эти процессы переработки затрачивается огромное количество энергии [6–7].

По экономическим и экологическим соображениям наиболее привлекательными являются технологии рециклинга композиционных материалов, обеспечивающие повторное использование компонентов.

В рамках нашего исследования был выбран один из самых простых, эффективных и экономически выгодных физических методов – измельчение.

Решение проблемы утилизации ПКМ – приоритетная материаловедческая задача, поскольку создание и внедрение новых материалов непременно приводит к образованию отходов. С учетом специфических свойств ПКМ, таких как стойкость к внешним воздействиям окружающей среды, проблема их утилизации носит, прежде всего, экологический характер, поэтому актуальность данных исследований не вызывает сомнений.

### МАТЕРИАЛЫ, МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объекты исследования в данной работе: в качестве наполнителя для цементной матрицы использовались крупно- и мелкодисперсные частицы на основе измельченных композитов, не отделяя матрицу от наполнителя, и отвержденного связующего.

Измельчение отвержденных композитных материалов проводилось на планетарной мельнице МП-4/1,0 З/Н 1109. В качестве композиционных материалов для получения частиц наполнителя в качестве возможной замены щебня в бетонной композиции были выбраны стеклопластик, углепластик и отвержденное связующее ЭД-20. Далее были изготовлены бетонные образцы кубической формы с размерами 30х30х30 мм следующего состава: эталонные образцы бетона без добавок, образцы с армирующими добавками измельченного связующего ЭД-20 с процентным содержанием 1 %, 5 % и 10 %, образцы с армирующими добавками измельченного стеклопластика на основе ЭД-20 с процентным содержанием 1 %, 5 % и 10 % и образцы с армирующими добавками измельченного углепластика на основе ЭД-20 с процентным содержанием 1 % и 5 %.

После изготовления бетонные образцы отверждались при комнатной температуре в течение 28 суток.

Далее были проведены испытания на сжатие (ГОСТ 10180-2012 [8]) эталонных бетонных образцов без наполнителя и образцов, содержащих различные армирующие наполнители.

Испытания на сжатие проводились на испытательной машине Instron 3369 со следующим режимом нагружения: скорость нагружения составляла 0,5 мм/мин, деформация образцов – 5 % [8].

На первом этапе исследования был определен оптимальный размер фракции наполнителя.

Для этого были проведены испытания на сжатие бетонных образцов с наполнением крупными фракциями измельченной отвержденной смолы ЭД-20 (рис. 1).

В результате проведенных испытаний можно отметить, что график стандартных образцов имеет равномерный характер нагружения в отличие от образцов, содержащих частицы отвержденной смолы ЭД-20, где прослеживаются интервальные скачки. Это можно объяснить тем, что за счёт гладкой поверхности частиц смолы не происходит необходимой адгезии с цементом, что в итоге влияет на процесс разрушения бетонных образцов.

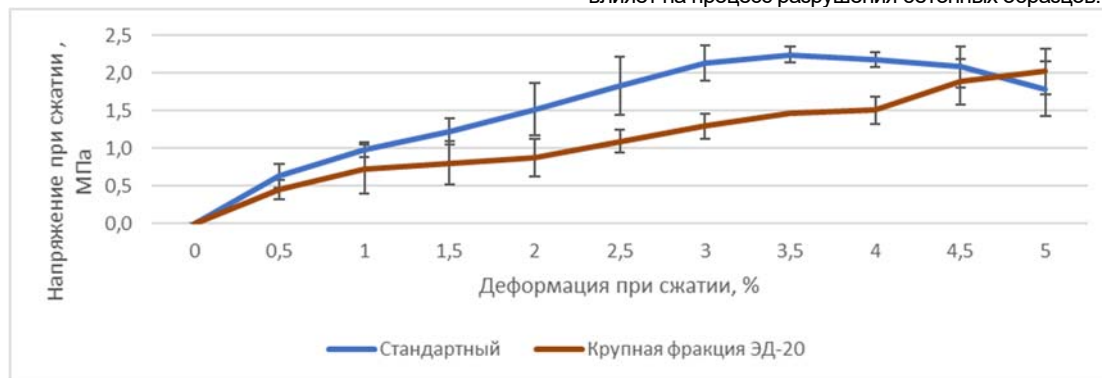


Рисунок 1 – Сравнение стандартных образцов бетона с образцами, наполненными крупными фракциями измельченной отвержденной смолы ЭД-20

Figure 1 – Comparison of standard concrete samples with samples filled with large fractions of crushed cured resin ED-20

Процесс разрушения образцов, наполненных крупными фракциями измельченной отвержденной смолы ЭД-20, происходил с характерным звуком треска отвержденного связующего.

По итогам испытания было принято решение проводить дальнейшие исследования не с крупнодисперсными наполнителями, а с измельченными мелкодисперсными частицами.

Данное решение предполагает в дальнейшем использование измельченных композиционных материалов и их компонентов в качестве добавок бетонов для улучшения их физико-механических свойств.

Для исследования были подготовлены мелкодисперсные порошки отвержденной смолы ЭД-20, а также стеклопластика и углепластика. Частицы добавлялись в цементную матрицу с различной степенью наполнения для определения закономерностей изменения физико-механических свойств композиции. Степень наполнения варьировалась от 0 до 10 %, что

согласуется с оптимальными значениями степени наполнения для композиций, содержащих дисперсный наполнитель.

В результате проведенных испытаний на сжатие были рассчитаны предел прочности на сжатие и модуль упругости. Полученные данные сведены в таблицы 1 и 2.

Из полученных результатов можно отметить, что у образцов, армированных частицами стеклопластика и углепластика, прочность на сжатие увеличивается с уменьшением концентрации, а у образцов, содержащих частицы смолы ЭД-20, наоборот – при увеличении концентрации наполнителя прочность на сжатие также увеличивается. Таким образом, можно сделать вывод, что наилучшими физико-механическими характеристиками обладают образцы с 1 % наполнением бетонных образцов частицами стеклопластика и с 10 % наполнением бетонных образцов частицами отвержденной смолы ЭД-20.

Таблица 1 – Предел прочности на сжатие наполненных и ненаполненных бетонных образцов

Table 1 – Compressive strength of filled and unfilled concrete samples

Наименование наполнителя	Предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}$ , МПа			
	0 %	1 %	5 %	10 %
Без наполнителя	2,24	–	–	–
ЭД-20	–	3,66	3,95	5,91
Стеклопластик	–	5,94	3,63	2,86
Углепластик	–	3,93	2,83	–

Таблица 2 – Модуль упругости наполненных и ненаполненных бетонных образцов

Table 2 – Modulus of elasticity of filled and unfilled concrete samples

Наименование наполнителя	Модуль упругости $E_{сж}$ , МПа			
	0 %	1 %	5 %	10 %
Без наполнителя	56,00	–	–	–
ЭД-20	–	64,62	166,67	253,33
Стеклопластик	–	176,00	58,82	63,33
Углепластик	–	120,00	40,00	–

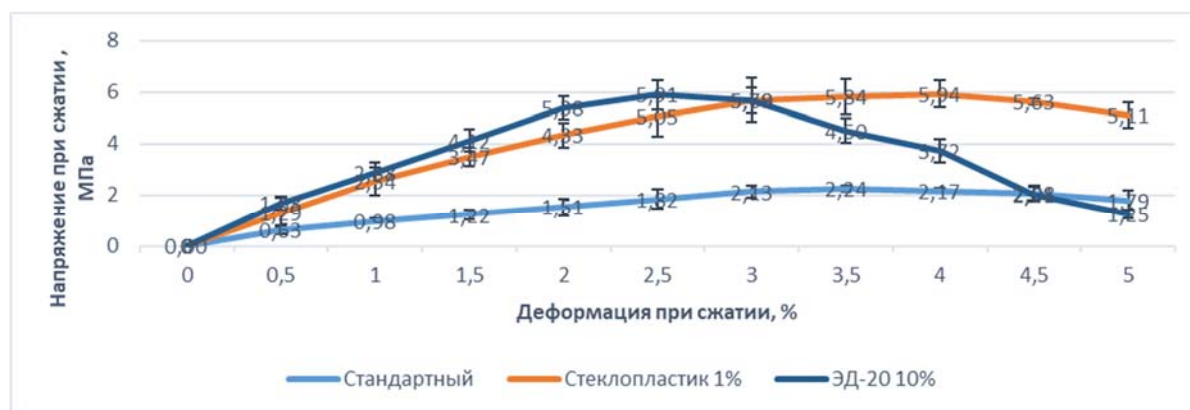


Рисунок 2 – Графики напряжения стандартных и наполненных бетонных образцов при сжатии

Figure 2 – Stress graphs of standard and filled concrete samples during compression

Наилучшие результаты улучшения физико-механических характеристик бетонных образцов представлены на рисунке 2. При сравнительном анализе графиков нагружения бетонных образцов можно выделить резкий перепад у образцов, наполненных частицами смолы ЭД-20 и плавный перепад у образцов, наполненных частицами стеклопластика, из чего можно сделать вывод, что об-

разцы, наполненные частицами стеклопластика, имеют более высокое сопротивление разрушению.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования, проводимые в данной работе, были направлены на решение двух актуальных задач – это решение проблемы утилизации полимерных композиционных материалов и повышение физико-механических свойств бетонов.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ БЕТОНОВ, АРМИРОВАННЫХ ЧАСТИЦАМИ ВТОРИЧНО ПЕРЕРАБОТАННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В результате было выяснено, что для наполнения бетонных образцов необходимо использовать мелкодисперсные частицы. Также при испытаниях на сжатие бетонных образцов с различной степенью наполнения можно отметить закономерность увеличения физико-механических характеристик бетонов с увеличением степени наполнения частицами отвержденной смолы ЭД-20, в то время как при наполнении бетонов частицами стеклопластика и углепластика наблюдалась обратная картина: с увеличением степени наполнения значения прочности на сжатие и модуля упругости уменьшались.

После анализа данных также стоит отметить аномальные результаты у образцов, наполненных частицами стеклопластика со степенью наполнения 5 %: его результаты нарушают тенденцию данной серии образцов, модуль упругости оказался меньше, чем ожидалось.

Как следствие, при использовании мелкодисперсных частиц в качестве наполнителей необходимо учитывать вид наполнителя, от которого будет зависеть степень наполнения бетонных изделий.

Таким образом, данные исследования подтверждают эффективность способа переработки полимерных композиционных материалов в виде мелкодисперсных добавок в бетон.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аржакова О.В. Полимеры будущего / Аржакова О.В., Аржаков М.С., Бадамшина Э.Р., Брюзгина Е.Б. [и др.] // Успехи химии, 2022, 91(12). RCR5062.
2. Семёнов С.П. Анализ моделей углеродного цикла применительно к исследованию болотных экосистем Западной Сибири / Семёнов С.П., Ташкин А.О. // Вестник Югорского государственного университета, 2022, 4 (67). С. 145–152.
3. Дворин Л.И., Дворин О.Л. Д24 Строительное материаловедение. М. : Инфра-Инженерия, 2013. 832 с.
4. Рамачандран В.С. Наука о бетоне : физико-химическое бетоноведение / В. Рамачандран, Р. Фельдман, Дж. Бодуэн ; пер. с англ. Т.И. Розенберг, Ю.Б. Ратиновой ; под ред. В.Б. Ратинова. Москва : Стройиздат, 1986. 278 с. : ил.
5. Петров А.В. Технологии утилизации полимерных композиционных материалов / Петров А.В., Дориомедов М.С., Скрипачев С.Ю. // Научно-технический журнал «ТРУДЫ ВИАМ», 2015. № 8.
6. Шайерс Дж. Рециклинг пластмасс: наука, технологии, практика. / Пер. с англ. СПб. : Научные основы и технологии, 2012. 640 стр. : ил.
7. Ф. Ла Мантия (ред.). Вторичная переработка пластмасс ; пер. с англ. под ред. Г.Е. Заикова. СПб. : Профессия, 2006. 400 стр. : ил.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare that there is no conflict of interest.*

*Статья поступила в редакцию 19 ноября 2024; одобрена после рецензирования 24 июня 2025; принята к публикации 10 июля 2025.*

*The article was received by the editorial board on 19 Nov 2024; approved after editing on 24 June 2025; accepted for publication on 10 July 2025.*

8. ГОСТ 10180-2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.

### Информация об авторах

*С. В. Морозов – кандидат технических наук, и.о. зав. кафедрой современных специальных материалов Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.*

*Я. М. Жумаканова – студент кафедры современных специальных материалов Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.*

### REFERENCES

1. Arzhakova, O.V., Arzhakov, M.S., Badamshina, E.R. and others. (2022). Polymers of the future. Uspekhi Chemistry, 2022, 91(12). RCR5062. (In Russ.).
2. Semenov, S.P. & Tashkin, A.O. (2022). Analysis of carbon cycle models applied to the study of wetland ecosystems in Western Siberia. Bulletin of Yugra State University, 4 (67). pp. 145-152. (In Russ.).
3. Dvorin, L.I. & Dvorin, O.L. (2013). D24 Construction Materials Science. M. : Infra-Engineering, 2013. 832 s.
4. Ramachandran, V.S., Feldman, R. & Baudouin, J. (1986). Science of Concrete: Physical and Chemical Concrete Science. trans. from English by T.I. Rosenberg, Yu.B. Ratinova; edited by V.B. Ratinov. Moscow : Stroyizdat, 1986. 278 p. (In Russ.).
5. Petrov, A.V., Doriomedov, M.S. & Skripachev, S.Yu. (2015). Technologies for recycling polymer composite materials. Scientific and technical journal "TRUDY VIAM", 2015. No. 8. (In Russ.).
6. Shires, J. (2012). Plastics recycling: science, technology, practice. Translated from English. St. Petersburg : Scientific foundations and technologies, 2012. 640 p.
7. F.La Mantia (ed.) (2006). Recycling of plastics trans. from English. ed. G.E. Zaikov. St. Petersburg : Profession, 2006. 400 p. (In Russ.).
8. HOST 10180-2012 (2011). Concretes. Methods for determining strength using control samples.

### Information about the authors

*S.V. Morozov - Ph.D. in Engineering Science, Docent of the Department of Modern Special Materials of the Polzunov Altai State Technical University.*

*Y.M. Zhumakanova - student of the Department of Modern Special Materials of the Polzunov Altai State Technical University.*