



Влияние формы и размеров частиц пластификатора на уменьшение жесткости термопластичных полимеров

Ю. Е. Якубовский, К. В. Кусков ✉, А. А. Хызов

Тюменский индустриальный университет, ул. Володарского, 38, Тюмень, 625000, Российская Федерация

✉ kuskovkv@tyuiu.ru



Аннотация. Способы переработки пластика можно разделить на три больших направления: химическая, термическая и механическая переработки. У каждого метода есть свои достоинства и недостатки. Наиболее распространенной является механическая обработка с получением вторичного сырья или композитных материалов. Одной из задач при получении композитных материалов данным способом является восстановление или улучшение их свойств за счет использования модификаторов. Свойства таких добавок зависят от формы и размеров частиц. С помощью энергодисперсионного анализа был определен элементный химический состав пластификатора на основе высокодисперсного гидроксида кальция. Рентгенофазовый анализ на дифрактометре ДРОН-7 позволил идентифицировать химические соединения, входящие в состав добавки. Методом электронной сканирующей микроскопии были определены форма и размеры частиц. Установлено, что наилучший результат, а именно уменьшение жесткости в 4 раза, достигнут при использовании сферических частиц размером 0.5–1 мкм.

Ключевые слова: размер частиц, рентгенофазовый анализ, энергодисперсионный анализ, форма частиц, электронная сканирующая микроскопия

Благодарности. Работа выполнена в рамках гранта «Западно-Сибирский межрегиональный НОЦ мирового уровня» от 27.11.2023 №210 ДОН.

Для цитирования: Якубовский Ю. Е., Кусков К. В., Хызов А. А. Влияние формы и размеров частиц пластификатора на уменьшение жесткости термопластичных полимеров. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2025;5(2):77–86. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-2-77-86> EDN: TKBIFS

Influence of the shape and size of plasticizer particles on the reduction of stiffness in thermoplastic polymers

Yurij E. Yakubovsky, Konstantin V. Kuskov ✉, Anton A. Khyzov

Industrial University of Tyumen, 38 Volodarskogo St., Tyumen, 625000, Russian Federation

✉ kuskovkv@tyuiu.ru



Abstract. Plastic can be recycling in three ways: chemical, thermal, and mechanical. Each method has its advantages and disadvantages. The most prevalent is mechanical processing, resulting in recycled materials or composite materials. A key objective in producing composite materials through this method is to restore or enhance their properties using modifiers. The properties of these additives depend on the shape and size of their particles. Energy-dispersive X-ray spectroscopy was used to determine the elemental chemical composition of a plasticizer based on highly dispersed calcium hydroxide. X-ray diffraction analysis performed on a DRON-7

diffractometer made it possible to identify the chemical compounds within the additive. Scanning electron microscopy was employed to determine the shape and size of the particles. The optimal result, specifically a four-fold reduction in stiffness, was achieved using spherical particles with a size range of 0.5–1 μm .

Keywords: particle size, X-ray diffraction analysis, energy-dispersive X-ray spectroscopy, particle shape, scanning electron microscopy

Acknowledgments. This work was supported by the "West Siberian Interregional Scientific and Educational Center of World Level" grant dated 27.11.2023 No. 210 of the Department of Education and Science.

For citation: Yakubovsky Yu. E., Kuskov K. V., Khyzov A. A. Influence of the shape and size of plasticizer particles on the reduction of stiffness in thermoplastic polymers. *Architecture, Construction, Transport*. 2025;5(2):77–86. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-2-77-86>



1. Введение / Introduction

В настоящее время производство пластика растет во всем мире, большая его часть не перерабатывается и попадает в океан или на свалки¹. Ученые всего мира занимаются этой проблемой и предлагают различные способы переработки пластика. Способы переработки можно условно разделить на три больших направления: химическая, термическая и механическая переработка. Термический способ, при котором переработка происходит при высокой температуре в правильно подобранной среде, например, применяется при производстве реактивного топлива за счет реакции пиролиза [1], производстве дизельного топлива за счет реакции пиролиза пластиковых отходов [2], производстве нанопористых адсорбентов из пластиковых отходов [3], получении пиролизного топлива [4]. Это направление имеет недостатки: в результате реакции в атмосферу могут выделяться вредные примеси; получаемый продукт требует дорогостоящей очистки, имеется сложно контролируемый по составу конечный продукт.

Химический способ переработки направлен на получение из полимерных отходов мономеров [5] или олигомеров [6], которые могут быть вновь использованы в качестве первичного сырья для нефтехимии. Такой подход также имеет существенные недостатки: требуются дорогостоящие катализаторы и высокая селективность при сортировке.

Наиболее распространенным способом является механическая переработка, широкое применение которой обуславливается ее дешевизной и масштабируемостью. Основана такая переработка на измельчении пластиковых отходов, их нагреве до температур плавления и получении гранул для дальнейшего применения, а также на использовании пластиковых отходов в качестве сырья для композитных материалов. Примерами являются переработка стекловолоконных лопастей ветряных турбин, изготовленных из термопластичных полимеров [7], переработка ПЭТ-тары [8], полиэтиленовых изделий [9] и вторичный пенополистирол [10]. К недостаткам данной технологии можно отнести ухудшение механических свойств, а также сложность сохранения этих свойств, ограниченные области повторного применения материалов [11].

Одним из востребованных направлений механической переработки является создание композитных материалов на основе песка, древесины и полимеров [11–14]. Однако при производстве таких изделий возникает острая необходимость корректировки механических свойств или их изменения путем добавления различных модифицирующих присадок [11, 15]. Модифицирующие до-

¹ A whopping 91 percent of plastic isn't recycled. URL: <https://education.nationalgeographic.org/resource/whopping-91-percent-plastic-isnt-recycled/> (дата обращения: 21.01.2025).

бавки могут в значительной степени изменять физико-механические свойства материалов, при этом значительную роль может сыграть не только их количество, но и размеры и форма частиц, входящие в эти добавки [16–18]. Таким образом, одним из важных направлений исследований является установление зависимостей механических и физических свойств композитных материалов от формы, размеров наполнителей и объема модификаторов.

В данной статье рассмотрено влияние размера и формы частиц, входящих в состав модификатора, на снижение жесткости полимерпесчаного композита. В качестве такой добавки использован высокодисперсный гидроксид кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) [19].

2. Материалы и методы / Materials and methods

С целью оценки элементного химического состава применен метод энергодисперсионного анализа на сканирующем электронном микроскопе JSM-6510A (JEOL Ltd., Япония). Рентгенофазовый анализ проводили на дифрактометре ДРОН-7 (НПП «Буревестник», Россия) с медной трубкой. Съемка велась на углах 2θ от 20 до 90°. При расшифровке полученных дифрактограмм использовалась база данных PDF-2 (2011). На основе информации о материалах в данной базе были определены формы элементарных ячеек веществ. Форма и размер частиц были исследованы с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-6510A с использованием токопроводящего скотча и при ускоряющем напряжении 20 кВ. Описание формы частиц проводили по ГОСТ 25849-83².

Образцы после получения представляли собой мелкодисперсную суспензию искомого вещества с водой. Для проведения элементного анализа в электронном сканирующем микроскопе образец не должен быть жидким или сыпучим, так как в камере создается вакуум, и несоблюдение требований может привести к поломке устройства. Было решено высушить образцы в воздушной среде при температуре не более 90 °С. Для этого образцы были помещены в электрическую камерную печь на 2 часа. После высушивания образцы представляли собой белый порошок. Необходимо отметить, что после удаления влаги образуются агломераты, которые разрушаются при легком надавливании.

Жесткость полимерпесчаного композита оценивали при испытании изделия «канализационный люк». Испытания проводили при различных нагрузках от 1 000 до 8 000 Н, действующих на центральную часть образца. Измеряемой величиной являлось перемещение центральной части люка. Размеры люка: диаметр – 580 мм; толщина – 25 мм; диаметр области приложения нагрузки – 150 мм.

3. Результаты и обсуждение / Results and discussion

Энергодисперсионный анализ проводили на поверхности агломератов и на мелких частицах. В таблице 1 представлены данные элементного состава, полученные в трех точках и приведенные к среднему арифметическому. Видно, что образцы имеют схожий элементный состав, кроме образца № 3. Вероятно, это связано с различными механизмами приготовления образцов.

Образец № 1

Образец № 1 представляет из себя агломераты, которые в свою очередь легко разрушаются при надавливании с образованием более мелких частиц. Размеры наиболее мелких частиц составляют около 11 мкм (рис. 1а). При этом частицы вещества имеют угловатую форму с наличием криволинейных поверхностей.

² ГОСТ 25849-83 Государственный стандарт Союза ССР. Порошки металлические. Метод определения формы частиц = Metal powders. The method of the determination of particle shape. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200011067> (дата обращения: 15.02.2025).

Таблица 1. Усредненные результаты химического состава агломератов
Table 1. Averaged results of the chemical composition of agglomerates

Номер образца	C	O	Si	Ca
1	12.87	53.80	1.75	31.58
2	23.47	51.14	3.32	22.07
3	16.44	56.91	–	26.65
4	34.93	32.99	–	32.08
5	12.5	60.42	–	27.08

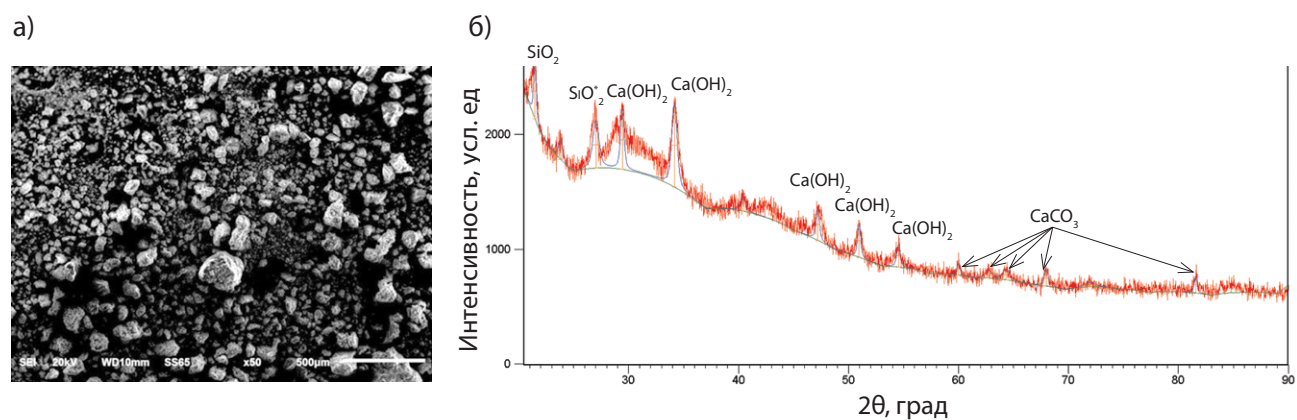


Рис. 1. Образец № 1: а) при увеличении 500 крат; б) дифрактограмма (фото и рисунок авторов)
Fig. 1. Sample No. 1: a) at 500x magnification; b) diffractogram (authors' photo and figure)

Рентгенофазовый анализ приведен на рис. 1б. Видно, что образец состоит из следующих фаз: оксида кремния SiO_2 с кубической решеткой; оксида кремния SiO^*_2 с гексагональной решеткой; гидроксида кальция с гексагональной решеткой; карбоната кальция с ромбоэдрической решеткой.

Образец № 2.

Частицы образца № 2 представлены на рис. 2а. Видно, что преобладают частицы размером около 45 мкм. При этом частицы плохо поддаются измельчению путем надавливания. Форма угловатая с наличием острых углов и граней.

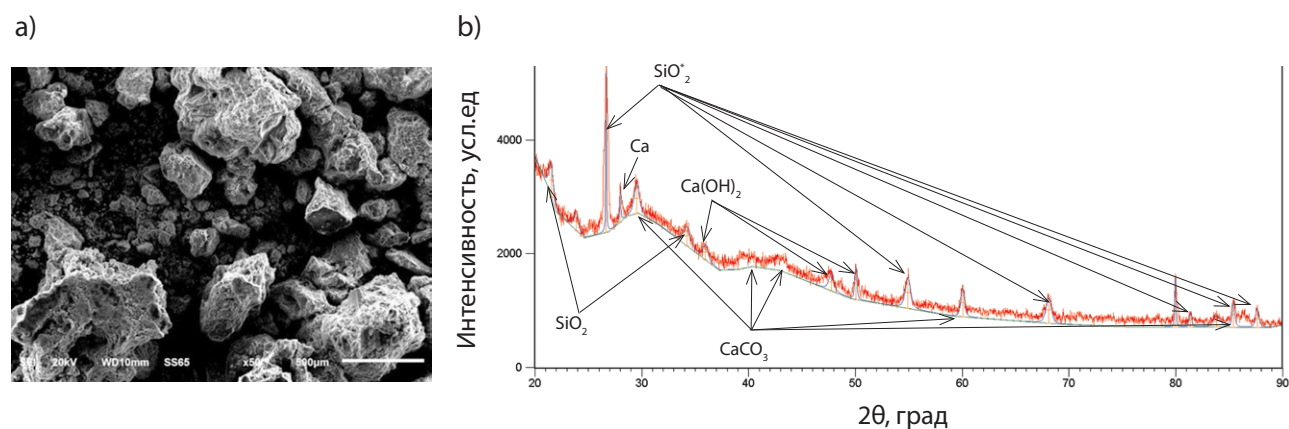


Рис. 2. Образец № 2: а) при увеличении 500 крат; б) дифрактограмма (фото и рисунок авторов)
Fig. 2. Sample No. 2: a) at 500x magnification; b) diffractogram (authors' photo and figure)

Рентгенофазовый анализ образца № 2 приведен на рис. 2b. Образец состоит из следующих фаз: оксид кремния SiO_2^* с гексагональной решеткой; оксид кремния SiO_2 с кубической решеткой; кальций с кубической решеткой; карбонат кальция с ромбоэдрической решеткой; гидроксид кальция с гексагональной решеткой.

Образец № 3

Изображение частиц образца № 3 представлено на рис. 3a. Частицы имеют округлую форму. Присутствуют крупные агломераты, которые при легком надавливании разрушаются с образованием мелких частиц размером 0.5–1 мкм.

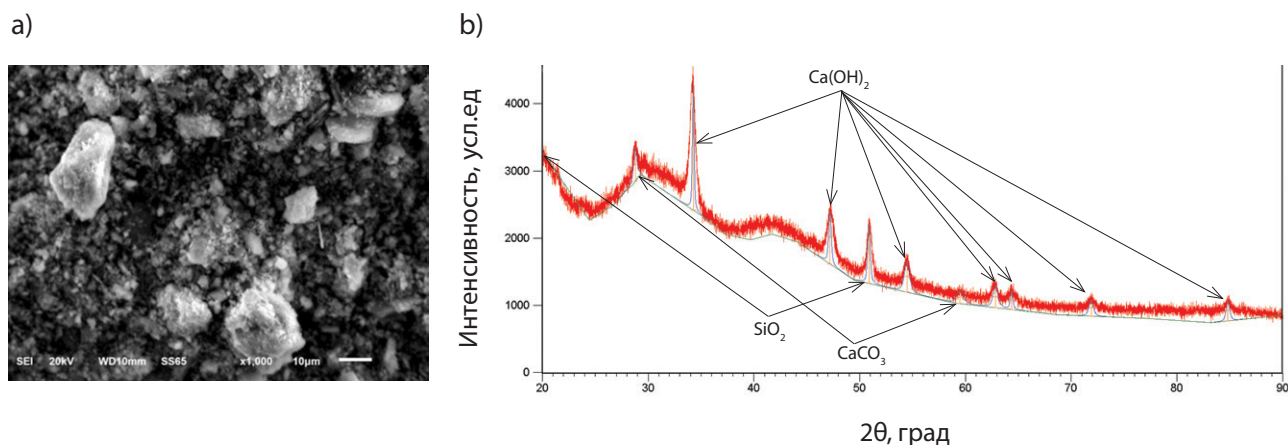


Рис. 3. Образец № 3: a) при увеличении 1000 крат; b) дифрактограмма (фото и рисунок авторов)
Fig. 3. Sample No. 3: a) at 1000x magnification; b) diffractogram (authors' photo and figure)

Рентгенофазовый анализ образца № 3 приведен на рис. 3b. Фазовый состав следующий: оксид кремния SiO_2 с кубической решеткой; карбонат кальция с ромбоэдрической решеткой; гидроксид кальция с гексагональной решеткой.

Образец № 4

Изображение частиц образца № 4 представлено на рис. 4a. Частицы представляют собой чешуйки угловатой формы. Крупные участки – агломераты, которые при легком надавливании разрушаются с образованием мелких частиц размером около 2 мкм.

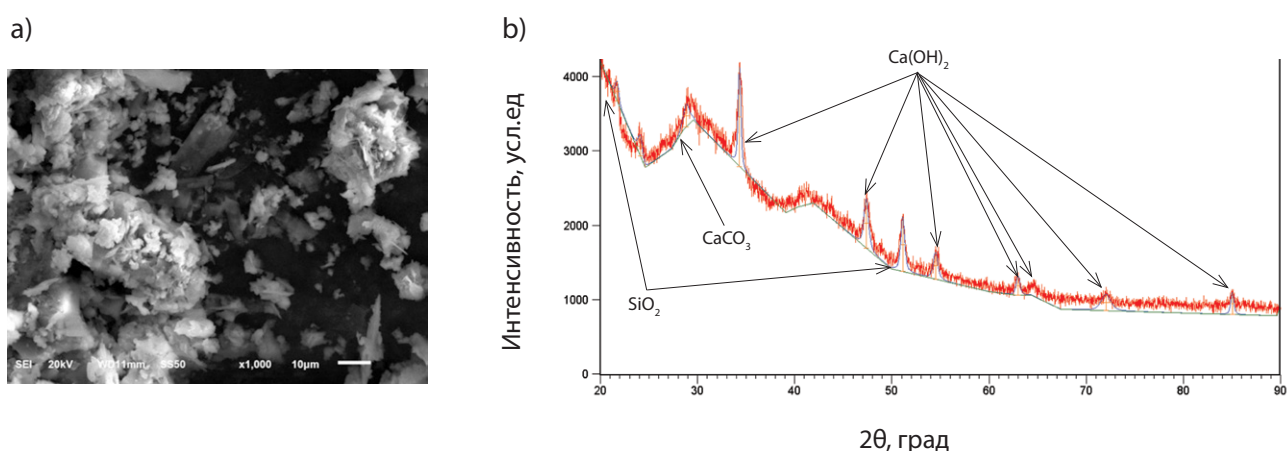


Рис. 4. Образец № 4: a) при увеличении 1000 крат; b) дифрактограмма (фото и рисунок авторов)
Fig. 4. Sample No. 4: a) at 1000x magnification; b) diffractogram (authors' photo and figure)

Рентгенофазовый анализ образца № 4 представлен на рис. 4b. Фазовый состав: SiO_2 с кубической решеткой; карбонат кальция с ромбоэдрической решеткой; гидроксид кальция с гексагональной решеткой. Стоит отметить, что по фазовому составу образец № 4 является наиболее чистым.

Образец 5

Изображение частиц образца № 5 представлено на рис. 5a. Видно, что частички имеют размер около 3 мкм и образуют плотные агломераты, которые с трудом разрушаются с образованием чешуек угловатой формы.

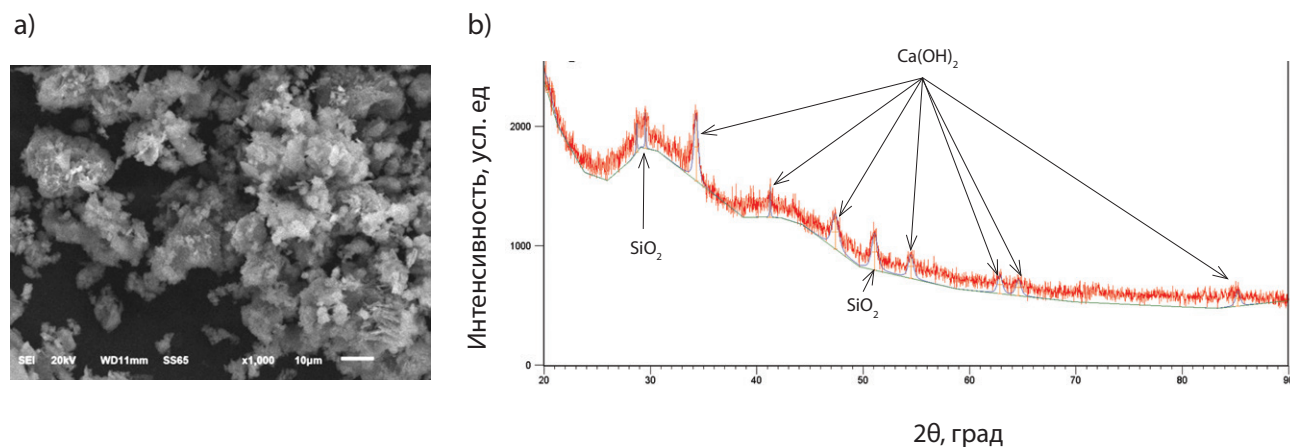


Рис. 5. Образец № 5: а) при увеличении 1000 крат; б) дифрактограмма (фото и рисунок авторов)
Fig. 5. Sample No. 5: a) at 1000x magnification; b) diffractogram (authors' photo and figure)

Рентгенофазовый анализ для образца № 5 представлен на рис. 5b. Фазовый состав: SiO_2 с кубической решеткой; карбонат кальция с ромбоэдрической решеткой; гидроксид кальция с гексагональной решеткой. По фазовому составу образец № 5 схож с образцом № 4, и они являются наиболее чистым по содержанию гидроксида кальция.

Полученные результаты сведены в таблицу 2, из которой видно, что образец № 3 является наиболее мелкодисперсным и его частицы имеют сферическую форму. Данный образец показывает лучшие результаты по уменьшению жесткости полимерпесчаного композита с термопластичными полимерами. Это было доказано в лабораторных условиях и продемонстрировано на изделии «канализационный люк», результаты испытаний представлены на рис. 6. В качестве базового изделия использовался полимерпесчаный композит без добавления пластификатора [20]. Влияние чистоты полученного пластификатора не оценивалось.

Таблица 2. Сравнение частиц, входящих в состав модификатора
Table 2. Comparison of particles composing the modifier

№ образца	Минимальный размер частиц, мкм	Форма частиц	Фазовый состав
1	11	Угловатая	SiO_2^* ; SiO_2 ; CaCO_3 ; Ca(OH)_2
2	45	Угловатая с наличием острых углов и граней	SiO_2^* ; SiO_2 ; CaCO_3 ; Ca(OH)_2 ; Ca
3	0.5–1	Округлая	SiO_2 ; CaCO_3 ; Ca(OH)_2
4	2	Чешуйчатая выраженная угловатость	SiO_2 ; CaCO_3 ; Ca(OH)_2
5	3	Чешуйчатая угловатость невыраженная	SiO_2 ; CaCO_3 ; Ca(OH)_2

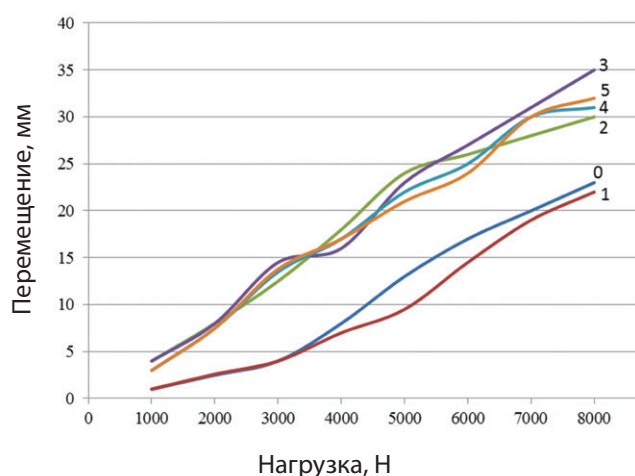


Рис. 6. Зависимость перемещения от приложенной нагрузки: 0 – без добавления пластификатора; 1 – образец № 1; 2 – образец № 2; 3 – образец № 3; 4 – образец № 4; 5 – образец № 5 (получена авторами)
Fig. 6. Dependence of displacement on applied load: 0 – without plasticizer addition; 1 – sample No. 1; 2 – sample No. 2; 3 – sample No. 3; 4 – sample No. 4; 5 – sample No. 5 (obtained by the authors)

4. Заключение / Conclusions

В результате исследования установлено, что при одинаковом химическом составе пластификатора дополнительную роль играет форма и размер частиц. В результате испытания пяти образцов только пластификатор с фазовым составом SiO_2 (кубическая решетка), CaCO_3 (ромбоэдрическая решетка) и $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (гексагональная решетка) и частицами сферической формы размером 0.5–1 мкм позволил снизить жесткость полимерпесчаного композита в 4 раза на линейном участке деформации и до 34 % на нелинейном участке. Вероятно, это связано с тем, что сферические частицы модификатора не имеют острых граней и при воздействии внешних разрушающих сил создают меньшие внутренние напряжения.

Планируется использование полученного пластификатора на основе $\text{Ca}(\text{OH})_2$ для изготовления длинномерных изделий из полимернопесчаной смеси методом экструзии. Это позволит расширить ассортимент и увеличить количество выпускаемой продукции, тем самым вовлечь дополнительные объемы пластиковых отходов.

■ **Вклад авторов.** Якубовский Ю. Е.: разработка концепции исследования, изготовление модифицирующих добавок; подготовка статьи и научное редактирование. Кусков К. В.: проведение рентгенофазового исследования, описание полученных результатов; подготовка статьи и научное редактирование. Хызов А. А.: подготовка образцов для исследования, проведение исследований на электронном микроскопе, описание полученных результатов.

Author contributions. Yurij E. Yakubovsky: development of a research concept, production of modifying additives; article preparation and scientific edition. Konstantin V. Kuskov: performing X-ray diffraction analysis, describing the obtained results; article preparation and scientific edition. Anton A. Khyzov: preparing samples for analysis, performing scanning electron microscopy, and describing the obtained results.

Конфликт интересов. Авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no relevant conflict of interest.

Список литературы

1. Zhang, Y., Duan D., Lei H., Villota E., Ruan R. Jet fuel production from waste plastics via catalytic pyrolysis with activated carbons. *Applied Energy*. 2019;251:113337. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113337>
2. Mangesh V. L., Padmanabhan S., Tamizhdurai P., Ramesh A. Experimental investigation to identify the type of waste plastic pyrolysis oil suitable for conversion to diesel engine fuel. *Journal of Cleaner Production*. 2019;246:119066. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119066>
3. Balpreet Kaur, Raj Kumar Gupta, Haripada Bhunia. Chemically activated nanoporous carbon adsorbents from waste plastic for CO₂ capture: Breakthrough adsorption study. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2019;282:146–158. <http://dx.doi.org/10.1016/j.micromeso.2019.03.025>
4. Патрушева Т. Н., Петров С. К., Матвеев П. В., Борцова С. С. Пиролиз как перспективное направление переработки пластиковых отходов для получения энергии. *Химическая технология*. 2021;22(8):355–359. <https://doi.org/10.31044/1684-5811-2021-22-8-355-359>
5. Coates G. W., Getzler Y. D. Y. L. Chemical recycling to monomer for an ideal, circular polymer economy. *Nature Reviews Materials*. 2020;5(7):501–516. <https://doi.org/10.1038/s41578-020-0190-4>
6. Awang N. W. B., Hadiyono M. A. B. R., Abdellatif M. M., Nomura K. Depolymerization of PET with ethanol by homogeneous iron catalysts applied for exclusive chemical recycling of cloth waste. *Industrial Chemistry & Materials*. 2025;(3):49–56. <https://doi.org/10.1039/d4im00081a>
7. Cousins D. S., Suzuki Ya., Murray R. E., Samaniuk J. R., Stebner A. Recycling glass fiber thermoplastic composites from wind turbine blades. *Journal of Cleaner Production*. 2019;209:1252–1263. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.286>
8. Вершков А. В., Донская М. А. Переработка пластиковых отходов в условиях Красноярского края. *Отходы и ресурсы*. 2023;10(1). <https://doi.org/10.15862/31INOR123>
9. Синичук А. Е., Родина Т. А. Использование вторичных гранул полиэтилена в производстве полимерных изделий. *Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки*. 2021;(93):104–107. <https://doi.org/10.22250/jasu.93.23>
10. Куликов В. Ю., Исагулов А. З., Щербакова Е. П., Ковалева Т. В. Исследование свойств полистирола с добавлением вторичных гранул строительного полистирола. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова*. 2017;15(4):40–46. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-4-40-46>
11. Чирков Д. Д., Кулаженко Ю. М., Биктимирова О. Е., Шкуро А. Е., Глухих В. В. Физико-механические свойства полимерных композитов с полимерной фазой поливинилхлорида и отходами производства линолеума. *Вестник Технологического университета*. 2023;26(10):69–74. https://doi.org/10.55421/1998-7072_2023_26_10_69
12. Стородубцева Т. Н., Аксомитный А. А., Кузнецов Д. С. Исследование теплофизических свойств древесно-полимер-песчаного композиционного материала. *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*. 2018;6(7):142–145. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36745462>.
13. Профатило И. В. К вопросу использования отходов полимеров при создании полимерпесчаных композиций. *Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 6. Техника*. 2019;9(1):126–134. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37082082>.
14. Крамаренко А. В., Мавлютов А. Н. Совершенствование состава полимер-песчаной черепицы. *Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник)*. 2018;(1):230–232. URL: <https://id-yug.com/index.php/ru/ntt/archiv/2018/1-2018?id=1036>.
15. Валеева А. Р., Алексеева А. Д., Саерова К. В. Изучение влияния фурфуролового спирта на твердость древесно-полимерного композита. *Актуальные проблемы лесного комплекса*. 2024;(65):191–192. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=67316890>.
16. Зимаклова Г. А., Каспер Е. А., Бочкарева О. С. Механические свойства цементных композитов, армированных керамическим волокном. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2024;(4):44–54. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2024-4-44-54>
17. Куюков С. А., Третьяков П. Ю., Тестешев А. А., Замятин А. В., Жигайлов А. А. Электропроводящий нагреваемый цементобетон на основе графита. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2024;(4):77–87. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2024-4-77-87>
18. Хантимиров А. Г., Абдрахманова Л. А., Низамов Р. К., Хозин В. Г. Древесно-полимерные композиты на основе поливинилхлорида, усиленные базальтовой фиброй. *Известия Казанского государственного архи-*

19. *тектурно-строительного университета*. 2022;(3):75–81. https://doi.org/10.52409/20731523_2022_3_75
20. Yakubovskiy Yu. E., Dubrovskiy E. G., Khairullina L. B., Aleksandrov S. V. Composite building materials based on recycled thermoplastic polymers. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2024;113:11311. URL: <https://unistroy.spbstu.ru/article/2024.114.11/>

References

1. Zhang, Y., Duan D., Lei H., Villota E., Ruan R. Jet fuel production from waste plastics via catalytic pyrolysis with activated carbons. *Applied Energy*. 2019;251:113337. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113337>
2. Mangesh V. L., Padmanabhan S., Tamizhdurai P., Ramesh A. Experimental investigation to identify the type of waste plastic pyrolysis oil suitable for conversion to diesel engine fuel. *Journal of Cleaner Production*. 2019;246:119066. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119066>
3. Balpreet Kaur, Raj Kumar Gupta, Haripada Bhunia. Chemically activated nanoporous carbon adsorbents from waste plastic for CO₂ capture: Breakthrough adsorption study. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2019;282:146–158. <http://dx.doi.org/10.1016/j.micromeso.2019.03.025>
4. Patrusheva T. N., Petrov S. K., Matveev P. V., Bortsova S. S. Pyrolysis as advanced processing direction of plastic waste for power generation. *Chemical Technology*. 2021;22(8):355–359. (In Russ.) <https://doi.org/10.31044/1684-5811-2021-22-8-355-359>
5. Coates G. W., Getzler Y. D. Y. L. Chemical recycling to monomer for an ideal, circular polymer economy. *Nature Reviews Materials*. 2020;5(7):501–516. <https://doi.org/10.1038/s41578-020-0190-4>
6. Awang N. W. B., Hadiyono M. A. B. R., Abdellatif M. M., Nomura K. Depolymerization of PET with ethanol by homogeneous iron catalysts applied for exclusive chemical recycling of cloth waste. *Industrial Chemistry & Materials*. 2025;(3):49–56. <https://doi.org/10.1039/d4im00081a>
7. Cousins D. S., Suzuki Ya., Murray R. E., Samaniuk J. R., Stebner A. Recycling glass fiber thermoplastic composites from wind turbine blades. *Journal of Cleaner Production*. 2019;209:1252–1263. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.28>
8. Vershkov A. V., Donskaya M. A. Recycling of plastic waste in the conditions of the krasnoyarsk territory. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 2023;(10)1. (In Russ.) <https://doi.org/10.15862/311NOR123>
9. Sinichuk A. E., Rodina T. A. Use of secondary polyethylene granules in the production of polymeric products. *Vestnik Amurskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i ekonomicheskie nauki*. 2021;(93):104–107. (In Russ.) <https://doi.org/10.22250/jasu.93.23>
10. Kulikov V. Yu., Issagulov A. Z., Shcherbakova E. P., Kovaljva T. V. Study of the properties of polystyrene containing secondary granules of expanded polystyrene. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2017;15(4):40–46. (In Russ.) <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-4-40-46>
11. Chirkov D. D., Kulazhenko Yu. M., Biktimirova O. E., Shkuro A. E., Glukhikh V. V. Physical and mechanical properties of polymeric composites with a polyvinyl chloride polymeric phase and linoleum production waste. *Herald of Technological University*. 2023;26(10):69–74. (In Russ.) https://doi.org/10.55421/1998-7072_2023_26_10_69
12. Storodubtseva T. N., Aksomitny A. A., Kuznetsov D. S. Study of the thermophysical properties of wood polymer sandy composition material. *Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika*. 2018;6(7):142–145. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36745462>
13. Profatilo I. V. To the question on the use of polymer wastes in creating polymer sanding compositions. *Vesnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Series 6. Engineering Science*. 2019;9(1):126–134. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37082082>
14. Kramarenko A. V., Mavlyutov A. N. Improvement of structure of polymer-peschanoy of the tile. *Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin)*. 2018;(1):230–232. (In Russ.) URL: <https://id-yug.com/index.php/ru/ntt/archiv/2018/1-2018?id=1036>
15. Valeeva A. R., Alekseeva A. D., Saerova K. V. Study of the effect of furfuryl alcohol on the hardness of a wood-polymer composite. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*. 2024;(65):191–192. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=67316890>
16. Zimakova G. A., Kasper E. A., Bochkareva O. S. Mechanical properties of cement composites reinforced with ceramic fiber. *Architecture, Construction, Transport*. 2024;(4): 44–54. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2024-4-44-54>

17. Kuyukov S. A., Tretyakov P. U., Testeshev A. A., Zamyatin A. V., Zhigailov A. A. Electrically conductive cement concrete using graphite. *Architecture, Construction, Transport*. 2024;(4):77–87. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2024-4-77-87>
18. Khantimirov A. G., Abdrakhmanova L. A., Nizamov R. K., Khozin V. G. Wood-polymer composites based on polyvinyl chloride reinforced with basalt fiber. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. (In Russ.) 2022;(3):75–81. https://doi.org/10.52409/20731523_2022_3_75
19. Yakubovsky Yu. E., Khairullina L. B., Dubrovsky E. G. Addressing environmental safety issues through recycling of secondary thermoplastics. *Ecology and Industry of Russia*. 2024;28(12):4–7. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2024-12-4-7>
20. Jakubovski Yu. E., Dubrovsky E. G., Khairullina L. B., Aleksandrov S. V. Composite building materials based on recycled thermoplastic polymers. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2024;113:11311. URL: <https://unistroy.spbstu.ru/article/2024.114.11/>



Информация об авторах

Якубовский Юрий Евгеньевич, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры прикладной механики, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, jakubovskijje@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6838-0631>

Кусков Константин Викторович, канд. техн. наук, доцент кафедры материаловедения и технологии конструкционных материалов, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, kuskovkv@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0698-8545>

Хызов Антон Александрович, старший преподаватель кафедры материаловедения и технологии конструкционных материалов, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, hyzovaa@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0009-0000-2869-0128>

Information about the authors

Yurij E. Yakubovsky, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Professor in the Department of Applied Mechanics, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, jakubovskijje@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6838-0631>

Konstantin V. Kuskov, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor in the Department of Materials Science and Technology of Structural Materials, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, kuskovkv@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0698-8545>

Anton A. Khyzov, Senior Lecturer in the Department of Materials Science and Technology of Structural Materials, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, hyzovaa@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0009-0000-2869-0128>

Получена 10 февраля 2025 г., одобрена 01 апреля 2025 г., принята к публикации 15 апреля 2025 г.
Received 10 February 2025, Approved 01 April 2025, Accepted for publication 15 April 2025