

УДК: 674.8122 © Р.Р. Фахрутдинов✉, В.Г. Сотников, 2026

UDC 674.8122 © R.R. Fakhrutdinov✉, V.G. Sotnikov, 2026

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», 420015, г. Казань, Россия
✉ e-mail: ryslan22437@gmail.com

Kazan National Research Technological University,
Kazan, 420015, Russian Federation
✉ e-mail: ryslan22437@gmail.com

Влияние технического углерода на физико-механические свойства древесно-полимерного композита*

Effects of technical carbon on the physical and mechanical properties of wood-polymer composites

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2026-4-77-80>

Одним из ограничений широкого применения древесно-полимерных композитов (ДПК) на основе древесной муки и вторичного полиэтилена высокой плотности является их недостаточная размерная стабильность. В данной работе исследуется влияние технического углерода (ТУ) на физико-механические свойства ДПК с целью повышения их устойчивости к деформациям. Технический углерод равномерно распределялся по поверхности гранул ДПК методом механического смешивания. Полученные гранулы подвергались горячему экструдированию, в результате чего формировалась пространственная сеть, в которой частицы технического углерода концентрировались преимущественно на границах между гранулами. Показано, что образцы с формированием сетчатой структуры обладают большей устойчивостью к ползучести, меньшим водопоглощением при определенной концентрации углерода. Это свидетельствует о высокой стойкости материала к внешним механическим нагрузкам, температурным воздействиям и влаге. Дополнительно установлено, что благодаря формированию жесткой углеродной сетки, такие композиты демонстрируют повышенный модуль упругости при растяжении, а их прочностные и ударные характеристики остаются на уровне композитов без технологической добавки в виде ТУ.

Ключевые слова: древесно-полимерный композит, технический углерод, размерная стабильность, термическое расширение, водопоглощение, прочность при растяжении, экструзия, вторичный полиэтилен, физико-механические свойства.

Для цитирования: Фахрутдинов Р.Р., Сотников В.Г. Влияние технического углерода на физико-механические свойства древесно-полимерного композита // Уголь. 2026;(4):77-80. DOI: 10.18796/0041-5790-2026-4-77-80.

Abstract

One of the limitations to the widespread use of wood-polymer composites (WPCs) based on wood flour and recycled high-density polyethylene is their insufficient dimensional stability. This study investigates the effect of carbon

ФАХРУТДИНОВ Р.Р.

Канд. техн. наук, доцент
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»,
420015, г. Казань, Россия,
e-mail: ryslan22437@gmail.com

СОТНИКОВ В.Г.

Канд. техн. наук, доцент
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»,
420015, г. Казань, Россия,
e-mail: vcvcvc12345678@gmail.com

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-26-00043, <https://rscf.ru/project/25-26-00043/>.

black (CB) on the physical and mechanical properties of WPCs with the aim of increasing their resistance to deformation. Carbon black was uniformly distributed on the surface of WPC granules by mechanical mixing. The resulting granules were subjected to hot extrusion, leading to the formation of a spatial network in which the carbon black particles were predominantly concentrated at the boundaries between the granules. A comparison of the resulting WPC with traditionally prepared composites showed that the samples with a network structure exhibited greater creep resistance and lower water absorption at a certain carbon concentration. This indicates the high resistance of the material to external mechanical loads, temperature effects, and moisture. It was additionally established that due to the formation of a rigid carbon network, such composites exhibit an increased tensile modulus, while their strength and impact characteristics remain at the level of composites without the technological additive in the form of carbon black.

Keywords

Wood-polymer composite, carbon black, dimensional stability, thermal expansion, water absorption, tensile strength, extrusion, recycled polyethylene, physical and mechanical properties.

Acknowledgements

The study was funded by the Russian Science Foundation grant No. 25-26-00043, <https://rscf.ru/project/25-26-00043/>.

For citation

Fakhrutdinov R.R., Sotnikov V.G. Effects of technical carbon on the physical and mechanical properties of wood-polymer composites. *Ugol'*. 2026;(4):77-80. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2026-4-77-80.

ВВЕДЕНИЕ

Древесно-полимерные композиты представляют собой перспективную альтернативу дефицитной массивной древесине и полимерным материалам на основе нефтепродуктов. Они находят широкое применение в строительстве, отделке и автомобилестроении [1]. Использование вторичных полимеров и древесных отходов для производства ДПК повышает их конкурентоспособность за счет экономической эффективности и экологической безопасности [2]. Однако на рынке нередко встречаются низкокачественные ДПК, что обусловлено неоднородностью свойств исходного сырья и несовместимостью поверхностных характеристик компонентов [3].

Одной из ключевых проблем, ограничивающих широкое применение ДПК, является их недостаточная размерная стабильность, которая сокращает срок службы изделий и повышает риск их разрушения в эксплуатационных условиях [4]. Основные проявления этой нестабильности включают термическое расширение, ползучесть и водопоглощение. Термическое расширение ДПК связано с вязкоупругими свойствами полимерной матрицы, в которой длинноцепочечные молекулы связаны между собой слабым межмолекулярным взаимодействием, вследствие чего при нагревании увеличивается расстояние между ними [5]. Ползучесть обусловлена постепенным смещением полимерных цепей под действием длительной нагрузки [6]. Водопоглощение связано с гидрофильностью древесных частиц и наличием слабых межфазных соеди-

нений, через которые влага проникает в структуру материала, приводя к его набуханию и снижению механических характеристик [7].

Для повышения размерной стабильности ДПК применяются различные методы, такие как модификация межфазного взаимодействия и введение жестких армирующих наполнителей. Введение неорганических наполнителей, таких как диоксид кремния или тальк, снижает коэффициент линейного теплового расширения на 30% и повышает устойчивость к влаге за счет модификации древесного наполнителя [8, 9, 10]. Однако во многих исследованиях учитывался только один фактор, влияющий на деформацию ДПК, и отсутствует комплексный подход к изучению их размерной стабильности. Кроме того, в литературе недостаточно внимания уделяется методам повышения стабильности ДПК, полученных на основе вторичного сырья.

Технический углерод является доступным и экономически выгодным наполнителем, обладающим высокой жесткостью, термостойкостью и стойкостью к атмосферным воздействиям. В промышленности ДПК его традиционно используют в качестве антистатика [11, 12].

Целью данного исследования является расширение применения древесно-полимерных композитов на основе отходов древесины и вторичного полиэтилена высокой плотности за счет повышения их устойчивости к деформациям и улучшения физико-механических свойств. В работе исследуется формирование жесткой углеродной сетки в ДПК путем гранулирования и горячего экструдирования, что позволяет получить материал с равномерно распределенным техническим углеродом в структуре. Оценка полученных образцов проводится в сравнении с традиционными ДПК, в которых нет технологической добавки в виде ТУ, а также с контрольными образцами, не содержащими технического углерода.

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

Процесс производства древесно-полимерного композита с добавлением технического углерода включает несколько последовательных стадий, каждая из которых направлена на формирование однородной смеси и получение материала с заданными физико-механическими характеристиками.

На первом этапе осуществляется подготовка древесного наполнителя. Отходы древесины загружаются в роторный измельчитель, где подвергаются механическому измельчению до частиц размером 0,25-0,75 мм. Этот процесс необходим для получения однородной древесной муки, обеспечивающей равномерное распределение наполнителя в полимерной матрице с ТУ.

На втором этапе проводится смешивание компонентов. Подготовленную древесную муку загружают в высокоскоростной смеситель, куда также добавляют технический углерод. В процессе смешивания частицы технического углерода равномерно распределяются по поверхности древесной муки за счет механической обработки и физической адсорбции, что способствует улучшению межфазного взаимодействия между наполнителем и полимерной матрицей.

После этапа смешивания полученную композицию направляют в экструдер, где происходит формирование сетчатой структуры древесно-полимерного композита. В экструдер подаются ресурсы вторичной переработки в виде гранул полиэтилена высокого давления (ПЭВД), которые расплавляются при температуре 145-160°C. Одновременно в зону плавления вводится предварительно подготовленный наполнитель (древесная мука с техническим углеродом или без него). В ходе процесса экструзии обеспечивается интенсивное перемешивание компонентов, что приводит к однородному распределению древесной муки и технического углерода в полимерной матрице. Время пребывания материала в зоне обработки составляет 10 минут.

После выхода из экструдера расплавленный композит через формовочную фильеру поступает в охлаждающую ванну, где проходит стадию стабилизационного охлаждения. Охлаждение осуществляется в воде при температуре 30°C, что позволяет предотвратить деформацию материала и обеспечить его равномерное затвердевание.

На заключительном этапе производится механическая обработка полученного материала. Композитный материал в виде террасной доски подается на обрезной станок, где осуществляется обрезка изделия до требуемых размеров.

Таким образом, в результате данного технологического процесса формируется древесно-полимерный композит с равномерным распределением технического углерода, что позволяет улучшить его физико-механические свойства, такие как прочность, термостойкость и влагостойкость.

На рисунке представлена схема производства древесно-полимерных композиционных материалов.

Для определения оптимального содержания технического углерода в образцах древесно-полимерного композита были проведены экспериментальные исследования, направленные на изучение его воздействия на качественные параметры композита (см. таблицу).

Как видно из представленных результатов, использование модификатора приводит к повышению прочностных и эксплуатационных показателей изделия по всем параметрам, что доказывает обоснованность его применения при изготовлении ДПК. Установлено, что использование

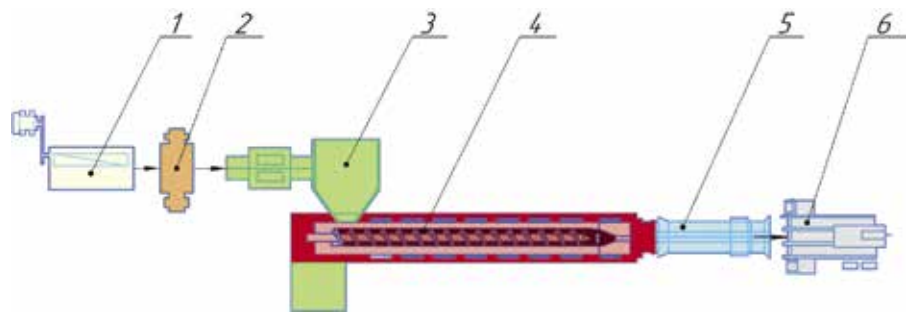


Схема производства ДПК: 1 – роторный измельчитель, 2 – высокоскоростной смеситель, 3 – бункер для загрузки сырья, 4 – шнек, 5 – охлаждающая ванна, 6 – обрезной станок

A production diagram of the wood-polymer composite: 1 – rotary grinder, 2 – high-speed mixer, 3 – raw material loading hopper, 4 – screw feeder, 5 – cooling bath, 6 – trimming machine

технического углерода менее 6% приводит к заметному ухудшению качественных характеристик изделий, а при использовании более 10% отмечается незначительное улучшение качественных свойств материала и отрицательное влияние на экономические показатели производства. Рекомендуемое количество технического углерода в композите составляет 7-10%, оно позволяет изготавливать высококачественный и эффективный с экономической точки зрения древесно-полимерный композит.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного исследования свидетельствуют о высокой эффективности применения технического углерода в качестве наполнителя ДПК на основе древесной муки и вторичного полиэтилена высокой плотности. Установлено, что формирование пространственно-жесткой углеродной сетки, возникающей при гранулировании и последующем горячем экструдировании, обеспечивает значительное улучшение размерной стабильности и физико-механических характеристик ДПК.

Экспериментально подтверждено, что при содержании технического углерода в диапазоне 7-10% достигается оптимальный баланс между прочностными характеристиками, водостойкостью и экономической целесообразностью. Превосходство таких композитов по пределу прочности при изгибе, растяжении, а также по твердости и износостойкости демонстрирует перспективность предложенного технологического подхода для повышения эксплуатационного ресурса изделий, изготавливаемых на основе вторичных сырьевых компонентов.

Влияние модификатора на качественные свойства композита

Effects of the modifier on the qualitative properties of the composite material

Параметр	Количество технического углерода						
	0%	2%	4%	6%	8%	10%	12%
Водопоглощение, %	4,8	4,6	4,4	3,9	3,8	3,7	3,7
Твердость, Н/мм ²	100	107	115,4	134,3	138	139,2	139
Истираемость, г/см ²	4	3,5	3	2,1	2,0	1,9	1,9
Предел прочности при растяжении, МПа	20,4	22,4	24,4	29	31	32,6	32
Предел прочности при изгибе, МПа	40,5	44,5	48,5	53,3	55	55	54,4
Удельное сопротивление выдергиванию шурупа, Н/мм	116	126	139	143,5	145	146	145,5

Список литературы • References

1. Термодинамика дезагрегированных полимерсодержащих композиций на основе нанодисперсных порошков Ni и NiO / Н.С. Володина, Т.В. Терзиян, А.П. Сафронов и др. // *Chimica Techno Acta*. 2015. Т. 2. № 1. С. 6-15.
Volodina N.S., Terzian T.V., Safronov A.P., Petrov A.V. Thermodynamics of disaggregated polymer-containing compositions based on nano-dispersed Ni and NiO powders. *Chimica Techno Acta*. 2015;2(1):6-15. (In Russ.).
2. Способ получения композиционного материала на основе отходов текстильной промышленности и арабиногалактана / Сафин Р.Г., Сафина А.В., Валеев К.В. и др. // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2021. № 6. С. 297-302.
Safin R.G., Safina A.V., Valeev K.V., Fakhrutdinov R.R. Method for obtaining composite material based on waste of the textile industry and arabinogalactan. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Tehnologiya tekstil'noj promyshlennosti*. 2021;(6):297-302. (In Russ.).
3. Влияние различных полимеров и технологических добавок на свойства древесно-полимерных композитов / Сафин Р.Г., Байгильдеева Е.И., Зиатдинова Д.Ф. и др. // *Системы. Методы. Технологии*. 2022. № 2 (54). С. 114-118.
Safin R.G., Baigildeeva E.I., Ziatdinova D.F., Fakhrutdinov R.R. Effects of different polymers and technological additives on the properties of wood-polymer composites. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. 2022;(2):114-118. (In Russ.).
4. Guchait A., Chattopadhyay S., Mondal T., Saxena A. Influence of Nanofillers on Adhesion Properties of Polymeric Composites. *ACS Omega*. 2022;7(5):3844-3859.
5. Lipińska M., Gaca M., Zaborski M. Curing kinetics and ionic interactions in layered double hydroxides–nitrile rubber Mg–Al-LDHs–XNBR composites. *Polymer Bulletin*. 2021;78(6):3199-3226.
6. Cao H., Duan L., Zhang Ya. et al. Current hydrogel advances in physicochemical and biological response-driven biomedical application diversity. *Signal Transduction and Targeted Therapy*. 2021;6(1):1-31.
7. Wei Y., Zhou H., Deng H. et al. “Toolbox” for the Processing of Functional Polymer Composites. *Nano-Micro Letters*. 2022;14(1).
8. Figovsky O., Beilin D. Polymer nanocomposites with high resistance to aggressive environment. *Scientific Israel – Technological Advances*. 2016;18(1):134-162.
9. Kudryavtsev P. On the issue of predicting the strength of adhesive joints in dispersed systems. *Scientific Israel – Technological Advances*. 2021;23(1-2):3-27.
10. Antonov A.S., Struk V.A., Wan X. et al. Nanocomposite Polymer Materials with High Performance Characteristics. *Material and Mechanical Engineering Technology*. 2024;4(4):36-43.
11. Buketov A.V., Shulga Yu.M., Fesenko I.P. et al. Increasing the Lifetime of Water Transportation Vehicles by Using Multifunctional Composites with a Polymer Matrix, Ultradisperse Diamond, and Discrete Fibrous Filler. *Journal of Superhard Materials*. 2024;46(1):40-54.
12. Irzhak V. Epoxy Nanocomposites with Carbon Fillers. *Reviews and Advances in Chemistry*. 2022;12(1):22-56.

Authors Information

Fakhrutdinov R.R. – PhD (Engineering), Associate Professor, Kazan National Research Technological University, Kazan, 420015, Russian Federation, e-mail: ryslan22437@gmail.com

Sotnikov V.G. – PhD (Engineering), Associate Professor, Kazan National Research Technological University, Kazan, 420015, Russian Federation, e-mail: vcvvcv12345678@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию: 24.02.2026

Поступила после рецензирования: 16.03.2026

Принята к публикации: 30.03.2026

Paper info

Received February 24, 2026

Reviewed March 16, 2026

Accepted March 30, 2026

Работникам СУЭК-Кузбасс присвоено почетное звание

Шесть горняков АО «СУЭК-Кузбасс» вошли в Указ Президента Российской Федерации, им присвоено почетное звание «Заслуженный шахтер Российской Федерации». Высокими наградами работники отмечены за многолетнюю добросовестную работу и значительный личный вклад в развитие угольной промышленности страны.

Соответствующий Указ № 147 подписан главой государства 12 марта 2026 г. Заслуженное звание присвоено электрослесарю подземному шахты имени С.М. Кирова Алексею Герасимову, проходчику этого же предприятия Виктору Кизилу, а также электрослесарю подземному Энергоуправления Вадиму Басаргину. В числе награжденных горнорабочие очистного забоя Дмитрий Кудряшов шахты имени В.Д. Ялевского и Иван Постоногов шахты имени А.Д. Рубана, электрослесарь подземный шахты «Талдинская-Западная 1» Евгений Сархандеев.



Каждый из награжденных посвятил многие годы работе под землей, обеспечивая добычу угля и безаварийную эксплуатацию сложного горно-шахтного оборудования. Высокий профессионализм, ответственность и многолетний безупречный труд горняков служат примером для коллег и вносят весомый вклад в стабильный рост производственных показателей предприятий. При выполнении плановых задач работники неукоснительно соблюдают требования промышленной безопасности, демонстрируя приверженность культуре безопасного труда.

Пресс-служба АО «СУЭК-Кузбасс»